COMMISSION GÉOLOGIQUE DU CANADA
ÉTUDE 88-17
Série géomagnétique no. 32

Compte rendu de l'atelier international sur les instruments d'observatoire magnétique

Ottawa, Canada

30 juillet-9 août 1986

sous la direction de R.L. Coles

subventionné par
l'Association internationale de géomagnétisme et d'aéronomie

1988

Énergie, Mines et Ressources Canada
Energy, Mines and Resources Canada

90-01163/

© Ministre des Approvisionnements et Services Canada 1988

En vente au Canada par l'entremise de nos

agents libraires agréés et autres librairies

ou par la poste au

Centre d'édition du gouvernement du Canada
Approvisionnements et Services Canada
Ottawa, Canada K1A 0S9

et aussi aux:

Bureaux de la Commission géologique du Canada,

601, rue Booth,
Ottawa, K1A 0E8

Un exemplaire en consignation de la présente publication est
également disponible dans les bibliothèques publiques à travers le Canada.

N° de catalogue M44-88/17F
ISBN 0-660-92498-6

Prix sujet à changement sans avis préalable

Also available in English

Manuscrit original reçu le 18 avril 1988
La version définitive pour la publication reçue le 20 juin 1988

TABLE DES MATIÈRES

1 Avant-propos

3 1. INTRODUCTION
5 Tour d'horizon de l'atelier
W.F. Stuart
6 Le Laboratoire géomagnétique d'Ottawa
R.L. Coles
8 Sommaire de l'atelier
R.L. Coles
8 Remerciements
R.L. Coles

9 2. SCÈNE SCIENTIFIQUE
11 Exigences scientifiques sur les données d'observatoires géomagnétiques
E.R. Niblett et R.L. Coles

17 3. INSTRUMENTS UTILISÉS À L'ATELIER

35 4. INSTRUMENTS ABSOLUS
37 Comparaisons des instruments de mesure absolues et observations faites pendant l'atelier
L.R. Newitt, D. Gilbert, E. Kring Lauridsen, J.Rietman et O. Veliz

45 5. COMPARAISONS DE VARIOMÈTRES NUMÉRIQUES
47 Mise en forme des données
G. Jansen van Beek et L.R. Newitt
50 Comparaisons de systèmes des variomètres numériques
R.L. Coles et D.F. Trigg

55 6. STANDARDS DISPONIBLES DANS LES OBSERVATOIRES MAGNÉTIQUES
57 Quelle précision est-il possible d'atteindre dans un observatoire magnétique de première classe comprenant un personnel complet?
C. Sucksdorff et M. Kuwashima
62 Mesures absolues du champ magnétique terrestre dans les observatoires français: résultats obtenues avec le magnétomètre portable à vanne de flux
D. Gilbert, J.M. Cantin, J. Bitterly, R. Schlich et J. Folgues
69 Critères de qualité pour les observatoires rarement visité ou avec personnel réduit
R.L. Coles, G. Jansen van Beek et L.R. Newitt

71 7. MATIÈRES SPÉCIALES
73 Problèmes posés dans les pays en voie de développement par l'enregistrement numérique des données aux observatoires magnétiques
D.R.K. Rao
74 Définition des termes utilisés dans la description des spécifications pour les instruments de géomagnétisme
B. Narod
75 Observation absolue de F au moyen d'un magnétomètre à protons
W.F. Stuart
76 Spécifications d'un variomètre idéal pour les applications d'observatoire magnétique
D.F. Trigg
78 Enregistrement numérique des variations du champ magnétique terrestre dans les observatoires français: description des équipements et résultats pour la période 1972-1986
J. Bitterly, J.M. Cantin, J. Burdin, R. Schlich, J. Folgues, et D. Gilbert

85 8. CONCLUSIONS
W.F. Stuart

Appendices
89 1. Bibliographie des magnétomètres R.L. Coles
93 2. Participants
96 3. Impressions des participants

Figures

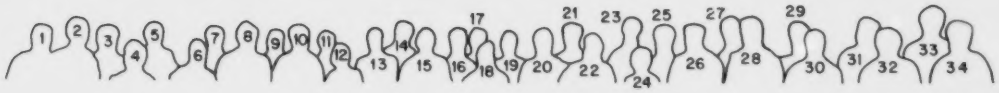
7 1.1 Le Laboratoire géomagnétique du chemin Anderson à Ottawa.
7 1.2 Plan du complexe non-magnétique du laboratoire.
11 2.1 Distribution des observatoires géomagnétiques en 1933.
11 2.2 Distribution des observatoires géomagnétiques en 1978.
12 2.3 Distribution des observatories géomagnétiques en 1987.
12 2.4 Distribution latitudinale des observatoires.
12 2.5 Distribution longitudinale des observatoires.
19 3.1 Le système AMOS III de l'observatoire d'Ottawa de la Commission géologique du Canada.
22 3.2 Le magnétomètre vectoriel à protons Littlemore ELSEC 8200 de l'observatoire d'Ottawa.
26 3.3 Le système DIMARS de l'institut Eotvos en Hongrie.
26 3.4 Diagramme du système DIMARS.
28 3.5 Diagramme du magnétomètre à vanne de flux de l'Institut météorologique royal de Netherlands.
41 4.1 La détermination des lignes de base pour le magnétomètre Thomson-Sintra dérivée des mesures absolues prisent durant l'atelier sur Pilier A et Pilier E.
42 4.2 La détermination des lignes de base pour le magnétomètre vectoriel ELSEC PPM.
42 4.3 La détermination des lignes de base pour le système AMOS d'Ottawa. Variation avec le temps, le 5 août 1986, des lignes de base entre l'ELSEC D, le Thomson-Sintra D et le AMOS Y.
43 4.4 Variation avec le temps, le 5 août 1986, des lignes de base entre l'ELSEC D, le Thomson-Sintra D et le AMOS Y. On montre aussi la variation de température à l'intérieur de l'abri où est situé le Thomson-Sintra et la variation extérieure.
50 5.1 Distribution des instruments de l'atelier sur le terrain du complexe non-magnétique.
50 5.2 Disponibilité des données digitales 3 composantes durant l'atelier.
51 5.3 Différences entre les variomètres de l'atelier et le variomètre de référence d'Ottawa (AMOS) pour le jour 217.
52 5.4 Différences entre le magnétomètre photoélectrique à torsion Hongrois DIMARS et le AMOS III d'Ottawa pour le jour 215.
52 5.5 Différences entre le magnétomètre photoélectrique à torsion de la Finlande et le AMOS III d'Ottawa pour les jours 216-217.
52 5.6 Différences entre le magnétomètre à vanne de flux Thomson-Sintra de France et le AMOS III d'Ottawa pour les jours 216-217.
53 5.7 Différences entre le magnétomètre à noyau annulaire des Etats-Unis et le AMOS III pour les jours 215-216.
53 5.8 Effet de la température sur le magnétomètre à protons ELSEC 8200 entre les jours 33 et 34, 1987.
59 6.1 Différence de la moyenne des mesures à chaque heure pour X,Y et Z avec les deux magnétomètres photoélectriques à torsion (TPM) de Nurmijarvi.
60 6.2 Déviations standards des mesures absolues de l'observatoire magnétique de Kakioka.
61 6.3 Valeurs de calibration pour le système KASMMER de l'observatoire magnétique de Kakioka.
63 6.4 Densité spectrale du bruit du magnétomètre portatif à théodolite IPGS.
64 6.5 Schéma blocs de magnétomètre portatif à théodolite.
64 6.6 Vue de l'équipement du magnétomètre portatif IPGS.
66 6.7 Valeurs des lignes de base pour l'observatoire magnétique Chambon la Forêt de janvier 1985 à juin 1986 avec le magnétomètre à théodolite DI et le magnétomètre vectoriel à protons.
67 6.8 Variations du niveau, de la température et des lignes de bases pour 1985 à l'observatoire magnétique Dumont d'Urville.
70 6.9 Valeurs des lignes de bases pour les observatoires magnétiques de Victoria, Meanook et St-John's en 1986.
80 7.1 Tests de calibration de la température pour le magnétomètre VFO 31.

81 | 7.2 Densité spectrale du bruit pour le magnétomètre VFO 31.
82 | 7.3 Schéma blocs du système d'observation magnétique digitale IPG.
83 | 7.4 Histogramme des valeurs de la déclinaison pour l'observatoire Chambon la Forêt.
83 | 7.5 Valeurs des lignes de base pour le variomètre triaxial Dumont d'Urville en 1984 et 1985.

Tableaux

18 | 3.1 Liste des instruments
39 | 4.1 Lignes de base D H et Z Thomson — Pilier A
40 | 4.2 Lignes de base D H et Z Thomson — Pilier E
40 | 4.3 Lignes de base D et I ELSEC — Pilier A
40 | 4.4 Lignes de base D et I ELSEC — Pilier E
40 | 4.5 Lignes de base X Y et Z AMOS — Pilier A
41 | 4.6 Lignes de base X Y et Z AMOS — Pilier E
41 | 4.7 Écarts types des lignes de base obtenues
42 | 4.8 Différences RMC journalières
58 | 6.1 Écarts types de mesures absolues à l'observatoire de Nurmijarvi, 1981-1985
61 | 6.2 Exactitude du système de KASMMER (écart-type)
81 | 7.1 Résumé des coefficients de température en nT/°C
82 | 7.2 Observatoires magnétiques français de hautes latitudes

Frontispice Les participants de l'atelier.



1. L. Wilson
2. A.W. Green, Jr.
3. J. Wood
4. M. Kuwashima
5. L. Hegymegi
6. Liu Chang–Fa
7. C. Sucksdorff
8. H. Deebes
9. L. Drimusz
10. W. Stuart
11. Z. Koros
12. Mme. Periou
13. J–J. Periou
14. E.R. Niblett
15. K.L. Svendsen
16. M. Hellard
17. W. Hannaford
18. R. Segal
19. D.R.K. Rao
20. W. Turewicz
21. D. Trigg
22. D. Gilbert
23. G. Jansen van Beek
24. Mme. Gilbert
25. J.P. Patel
26. C. Chapman
27. L. Newitt
28. T. Zelinka
29. O. Rasmussen
30. E. Kring Lauridsen
31. A. Orozco
32. O. Veliz
33. L. Hakkinen
34. R. Coles

ABSENT

I. Bell
J. Buckle
T. Dobush
W. Griffith
I. Hrvoic
J. Rietman
J. Sevenhuysen
P. Smith
G. Tibenski
P. Serson
D. Wallis
B. Narod

AVANT-PROPOS

L'idée d'un atelier international sur les instruments d'observatoire magnétique a germé au cours d'un entretien entre MM. Stuart et Sucksdorff lors des assemblées de l'UGGI (Union internationale de géodésie et de géophysique) à Hambourg, en 1983. Au cours des mois suivants, M. Stuart a émis l'idée au Groupe de travail V-1 de l'AIGA (Association internationale de géomagnétisme et d'aéronomie) et nous sommes convenus qu'Ottawa pourrait organiser et accueillir une petite réunion de spécialistes de ce type. Le Laboratoire géomagnétique de la Commission géologique du Canada offrait en effet l'espace et les installations nécessaires à des mesures magnétiques. À Prague, le Groupe de travail organisa une réunion spéciale pour informer les membres de l'AIGA du projet afin d'obtenir leur soutien avant de présenter une demande officielle d'autorisation et de financement auprès de l'AIGA et du ministère canadien de l'Énergie, des Mines et des Ressources.

Bref, l'idée fut bien reçue à Prague et, grâce au soutien enthousiaste des chercheurs concernés, les autorisations et les fonds nécessaires furent facilement obtenus. Nous sommes redevables à l'UGGI, à l'AIGA et à la Commission géologique du Canada du soutien offert et de la permission d'utiliser les installations du Laboratoire géomagnétique d'Ottawa.

C'était la première fois que se tenait un atelier international sur les instruments d'observatoire magnétique. Le principal objectif était de mettre à la disposition des spécialistes un environnement adéquat pour des essais de performance et de spécification de magnétomètres et de systèmes d'enregistrement, qu'il s'agisse de nouveaux appareils ou de matériel déjà sur le marché, destinés aux observatoires magnétiques. L'intention était de rassembler ceux qui fabriquent les instruments et ceux qui les utilisent dans l'espoir que les échanges se révèleraient fertiles pour tous. Si ce fut le cas, et nous le pensons, les efforts de tous ceux qui ont participé à l'organisation des différentes activités ont été bien récompensés. Nous sommes infiniment reconnaissants à tous les participants qui ont assisté à l'atelier et qui ont contribué à son succès en apportant des instruments ou en faisant partager leur expérience dans les domaines des mesures et des méthodes d'observation.

E.R. Niblett
Président
Groupe de travail V-1 de l'AIGA

1. INTRODUCTION

TOUR D'HORIZON DE L'ATELIER

W.F. Stuart[1]

En ce tout début de l'atelier sur les observatoires et les méthodes géomagnétiques, il convient de remercier ceux et celles qui l'ont rendu possible. L'atelier sera très différent des assemblées internationales habituelles car c'est avant tout une expérience et il a fallu beaucoup de courage pour accepter la responsabilité de l'accueillir.

Je désire remercier Bill Hutchison (sous-ministre adjoint du ministère de l'Énergie, des Mines et des Ressources), Ray Price (directeur-général de la Commission géologique du Canada), Jim Tanner (géophysicien principal) et Mike Berry (directeur de la Division de la géophysique) d'avoir approuvé la suggestion d'organiser l'atelier à Ottawa et d'avoir encouragé leur personnel à participer à la préparation des différentes activités. Surtout, nous leur sommes reconnaissants d'avoir permis aux participants de l'atelier d'utiliser l'un des meilleurs sites d'observation au monde, le laboratoire géomagnétique de Blackburn. M. Tanner faisait remarquer qu'il le considérait comme un atout national; je suis certain qu'une fois l'atelier terminé, le laboratoire sera considéré comme un atout international.

Ron Niblett (chercheur principal à la Division de la géophysique), Richard Coles (chef de la Section de géomagnétisme), Doug Trigg (chef de la Section des instruments géophysiques), Gerrit Jansen van Beek et Larry Newitt se sont chargés de l'organisation locale qui a permis la tenue de l'atelier. Je les remercie de leur dévouement. L'expression Comité d'organisation local est beaucoup trop faible pour décrire tout le travail qui a été mis dans la préparation de cet atelier, comme chacun pourra s'en rendre compte en visitant le Laboratoire, et je voudrais en profiter maintenant pour parler au nom de tous les participants et exprimer ma gratitude à tous les membres des Sections du géomagnétisme et des instruments géophysiques pour le travail qu'ils ont réalisé et pour celui qu'ils effectueront encore afin que cette rencontre soit un succès.

Les instruments mis à la disposition des participants proviennent de sept fournisseurs commerciaux (Dowty, R.-U.; GEM, Canada; Littlemore, R.-U.; Narod, Canada; Scintrex, Canada; EDA, Canada; Thomson CSF, France) et d'organismes privés de divers pays: Danemark, Finlande/Pologne, Pays-Bas, Pérou, États-Unis et, bien entendu, du Canada.

Cette liste de remerciements explique très clairement le premier objectif de l'atelier: permettre à ceux qui pensent savoir comment effectuer des mesures géomagnétiques de travailler avec ceux qui pensent savoir comment fabriquer des magnétomètres de façon qu'ils puissent parler de leurs problèmes et chercher ensemble des solutions.

Bien entendu, il y aura des évaluations, mais j'espère qu'il ne s'agira pas seulement d'évaluations « d'instruments par des chercheurs ». Je souhaite que les méthodes scientifiques soient aussi remises en question et que, tout comme les anciens instruments font place à la technologie moderne, certaines des notions désuètes sur les méthodes et les normes d'observation soient remplacées par des idées rationnelles sur la résolution, la stabilité et la précision absolue qui ont un lien direct avec la recherche et la science commerciale qui utilisent les données géomagnétiques. Nous ne sommes pas ici seulement pour essayer des instruments. L'expérience acquise avec l'équipement mis à notre disposition sera certainement de grande valeur pour chacun et, si nous pouvons préparer un résumé écrit des activités des dix prochains jours, elle aura encore plus de valeur pour les observateurs des quelque 150 observatoires qui ne sont pas représentés ici et, ce qui est peut-être encore plus important, pour les organismes qui dirigent les observatoires.

Je pense qu'il est important que nous ne nous contentions pas de défendre nos intérêts, mais que nous essayions de tenir compte des problèmes auxquels presque tous les observatoires actuels doivent faire face. Ces problèmes peuvent se résumer ainsi: la science et les communications requièrent des données numériques alors que le géomagnétisme apparaît démodé aux gouvernements et aux organismes de financement. Plus précisément, les observatoires géomagnétiques ont besoin de renouveler complètement leurs instruments et d'engager un personnel capable de faire fonctionner le nouvel équipement, mais les instituts qui dirigent les observatoires pensent que tout cela coûte trop cher.

Démodé peut être entendu de deux façons: « qui ne vaut pas la peine d'être conservé » ou « qui doit être remplacé par la nouvelle mode ». Nous devons faire en sorte que ceux qui financent les observatoires retiennent la seconde acception.

Je ne crois pas que les coûts soient nécessairement très élevés si l'on se fixe des objectifs réalistes en ce qui concerne la précision et la stabilité et si l'on adopte une attitude rationnelle en ce qui a trait à l'enregistrement, à la préparation et au contrôle de qualité des données. Je souhaite qu'au cours de l'atelier, nous essayions de spécifier les objectifs et de décrire ce qui serait un traitement des données adéquat.

J'éprouve souvent de grandes difficultés à expliquer les problèmes fondamentaux d'un observatoire géomagnétique à ceux qui me disent: « voilà 150 ans que vous mesurez le champ, vous devriez savoir comment faire maintenant ». Si quelqu'un a une explication simple et correcte, j'aimerais l'entendre. Au mieux, je peux dire que nous essayons de mesurer quelque chose qui varie de façon complexe dans le temps avec des instruments qui ne sont pas stables dans le temps. Chaque mesure prend si longtemps qu'elle doit être corrigée en fonction des variations temporelles du champ entre les mesures et il faut encore essayer d'atteindre une précision qui se situe dans les limites minimales de bruit des instruments disponibles.

Cela paraît impressionnant, mais en fait cela ne veut pas dire grand chose et rares sont ceux qui se laissent impressionner. En pratique, cela signifie que la seule façon de savoir si un observatoire travaille correctement consiste à faire des observations et à les enregistrer pendant une longue période de temps, des dizaines d'années par exem-

1. Président de la Division V, AIGA

ple, et à utiliser ensuite les résultats pour étudier un certain aspect du champ géomagnétique comme le champ régional, la variation séculaire ou encore une caractéristique quelconque des champs externes. Dans 99 % des cas, l'étude ne peut être effectuée correctement à partir des données d'un seul observatoire. Peu importe avec quel soin les observations sont faites, c'est seulement avec les résultats des études menées à l'aide des données de cet observatoire et de celles provenant d'autres observatoires que l'on peut vérifier la précision des mesures.

Ce ne sont pas tous les observatoires qui bénéficient du soutien de groupes de recherche dédiés au contrôle de leur performance. Probablement la moitié des observatoires du monde entier travaillent dans l'isolement le plus complet. Il est important pour nous de réfléchir aux moyens de persuader les organismes en charge de ces observatoires de la valeur que ces derniers représentent pour chaque pays ainsi que pour la communauté internationale et qu'il est temps d'adopter les nouvelles technologies qui deviendront indispensables avant la fin de la prochaine décennie. Une partie de la réponse réside dans l'établissement d'un moyen de communication permettant d'informer ces organismes de ce qui se passe dans la communauté scientifique internationale et de les conseiller au sujet du type de recherche à envisager. À cet égard, nous, les spécialistes des observatoires, nous devrions peut-être demander aux chercheurs d'adopter des programmes en faveur des observatoires magnétiques.

Je pense que le géomagnétisme retrouvera la faveur des organismes de financement au cours des années 90, avec la mise en oeuvre des vastes programmes internationaux de recherche sur la dynamique de la Terre et l'histoire de la Terre. On planifie déjà un programme international sur la biosphère de la géosphère et un autre consacré à la physique solaire terrestre. Il sera alors plus nécessaire que jamais de disposer d'un bon réseau global d'observations au sol pour compléter les mesures magnétiques effectuées à partir de satellites. Il serait très utile de pouvoir agir dès maintenant pour aider les observatoires existants à se préparer à répondre à cette demande le moment venu.

Pour encourager ceux d'entre nous qui s'intéressent plus aux retombées commerciales qu'aux problèmes scientifiques, je pense sincèrement que le futur regain d'activités en géophysique élargira le marché des magnétomètres à faible dérive et à haute résolution ainsi que celui des systèmes de saisie et de traitement des données simples et compacts. Il se peut aussi qu'il se crée un marché important pour des systèmes de télécommunications permettant le transfert des données à prix raisonnable.

Ce « tour d'horizon » est probablement moins précis que vous ne l'aviez prévu. Sincèrement, je ne crois pas que j'aie vraiment besoin de souligner ce qui est évident. Bien entendu, nous serons tous amenés à examiner et à utiliser les instruments, mais cela ne vaudra pas vraiment la peine si nous ne faisons pas part de ce que nous aurons appris à la communauté scientifique en général. J'espère que cette réunion très spéciale nous permettra d'offrir quelques bons conseils de grande portée à la communauté internationale et que ces conseils porteront fruits.

LE LABORATOIRE GÉOMAGNÉTIQUE D'OTTAWA

R.L. Coles

Des études en vue de l'installation d'un nouvel observatoire géomagnétique dans la région d'Ottawa ont été menées au début des années 60. Les conditions suivantes devaient être réunies: a) l'endroit ne devait présenter aucune grosse anomalie magnétique naturelle; b) il devait être exempt de perturbations artificielles telles que celles associées à la circulation routière, aux bâtiments, aux installations électriques et aux opérations industrielles; c) on devait être à peu près certain que l'environnement magnétique resterait adéquat pendant au moins 50 ans.

On a trouvé un site approprié sur une colline est-ouest limitée au nord et au sud par des terrains marécageux. La colline date de la période géologique récente et fut, il y a longtemps, une île de la mer Champlain. Le sol est un sable fluviatile déposé sur de l'argile marine.

Une voie de chemin de fer passe à environ 2 km au sud du site. Les trains sont tirés par des locomotives diesels. Une seconde voie au nord est fermée depuis déjà quelques temps et les rails ont été enlevés récemment.

Un kilomètre carré de terrain a été réservé sur la colline, dans la ceinture verte de la ville d'Ottawa. Un accord a été conclu avec le Service canadien des forêts pour que la reforestation dans la région soit limitée et ne nuise pas au fonctionnement de l'observatoire et des laboratoires magnétiques.

La construction des laboratoires magnétiques a débuté en 1965 et s'est achevée en 1968 (fig. 1.1). Les bureaux, les laboratoires d'essais et les ateliers ont été concentrés dans un bâtiment principal à un seul étage. Le complexe abrite aussi les activités paléomagnétiques et les travaux de mise au point des instruments. Une zone d'accès limité, non magnétique, d'environ 500 m par 600 m a été réservée à côté du laboratoire principal (figure 1.2). Dans cette zone, 16 bâtiments ont été érigés à des fins particulières. Les bâtiments sont en béton et en bois. On a vérifié que le sable, le gravier et les autres matériaux utilisés pour la construction des bâtiments n'étaient pas magnétiques. Tous les agrégats utilisés dans le béton étaient constitués de calcaire broyé. Les accessoires électriques, le matériel de chauffage, la quincaillerie utilisée pour les portes ont tous été choisis avec soin et ne sont pas magnétiques. Des lignes électriques et des câbles de transmission souterrains, placés dans deux conduits soigneusement isolés, relient tous les bâtiments au laboratoire principal.

L'observatoire magnétique d'Ottawa comprend actuellement quatre de ces bâtiments et un entrepôt. Le bâtiment des variomètres (n° 2) (6 m × 6 m) est divisé en deux. Une salle loge la sonde à vanne de flux qui comporte trois composantes et qui est placée dans une boîte isolée à commande thermostatique. L'autre salle abrite le magnétomètre à précession de protons. Le matériel électronique et les systèmes d'enregistrement accompagnant les variomètres sont installés dans le bâtiment n° 3 de la même taille que le bâtiment n° 2. Le bâtiment n° 4 (12 m × 5 m) abrite

les instruments absolus; le pilier principal est en marbre. Un magnétomètre à vanne de flux secondaire fonctionne aussi dans ce bâtiment pour fournir des données lorsque le variomètre principal ne fonctionne pas. Le bâtiment n° 5 (12 m × 5 m) a été utilisé pour les essais et les étalonnages jusqu'à ce que le laboratoire fasse récemment l'acquisition d'un magnétomètre vectoriel à précession de protons Elsec 8200. Le fonctionnement continu de cet instrument interdit toute autre mesure géomagnétique dans le bâtiment.

Figure 1.1 Le Laboratoire géomagnétique du chemin Anderson à Ottawa.

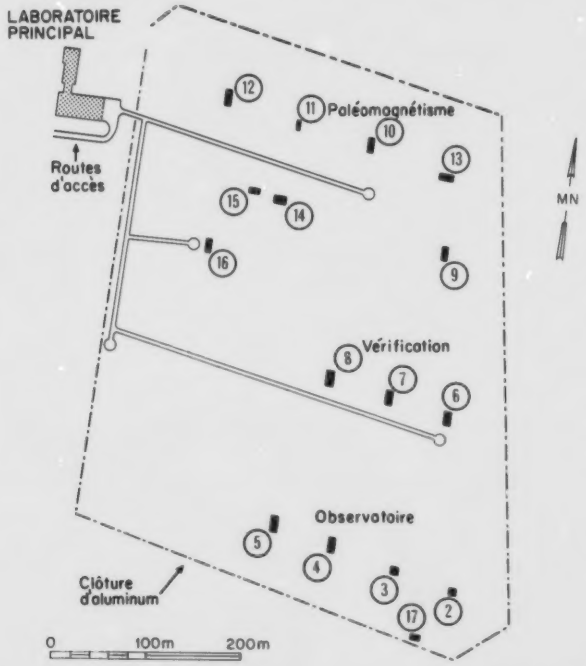


Figure 1.2 Plan du complexe non-magnétique du laboratoire.

SOMMAIRE DE L'ATELIER

R.L. Coles

L'atelier international sur les instruments d'observatoire magnétique avait lieu au laboratoire géomagnétique de la Commission Géologique du Canada, ministère de l'Énergie, des Mines et Ressources. Quarante et un individus, provenant de dix-sept régions, ont participé à une série de tests et de discussions sur les instruments couvrant ainsi les procédures actuelles de mesure et la réduction des données. Vingt-neuf magnétomètres et enregistreurs ont été fournis par sept compagnies et plusieurs centres de recherche gouvernementales.

Au début, une période à été allouée aux participants pour leurs permettre de se familiariser avec le fonctionnement des équipements. Toutes les pièces étaient démontrées et les propriétaires répondaient aux questions du groupe. Ceci a permis aux délégués de se familiariser avec les instruments en fonctionnement et de choisir les options disponibles pour comparer les données des jours suivants.

Les tests subis se divisent en deux catégories:
a) mesures absolues et comparaisons
b) enregistrement des variations géomagnétiques et comparaisons

Pour les observations absolues du vecteur du champ magnétique, cinq instruments ont été utilisés pour les mesures et deux supplémentaires étaient disponible pour la démonstration. Les valeurs locales d'Ottawa étaient disponibles à des fins de références et de comparaisons.

Quelques variomètres fournis avaient une sortie analogique facilitant les comparaisons. De plus, les données principales étaient la plupart du temps sous forme digitale. Les employés d'Ottawa ont transféré les données des instruments individuels dans un format utilisables avec les ordinateurs du laboratoire. Le produit fini des données prend la forme d'une suite de fichiers de l'enregistrement des variations des différents instruments et est disponible sous forme de disquettes ou de bandes magnétiques. La section du géomagnétisme d'Ottawa a analysé les données en utilisant ses propres enregistrements de références. Les rapports détaillés sont inclus dans le présent compte rendu.

La forme que l'on a donnée à l'atelier est nouvelle. À chaque jour, après quelques minutes à parler de choses administratives, les participants étaient libres de travailler à leurs instruments et aussi à s'initier aux instruments apportés par d'autres participants, ou encore, de discuter d'expériences et de problèmes relatifs à la conception, à la construction et à l'utilisation d'instruments d'observatoire.

Aucune conférence ou séance de discussion officielle n'avait été organisée avant la tenue de l'atelier. Toutefois, du temps avait été réservé chaque jour pour des discussions libres sur des sujets intéressants pour les participants. Les thèmes de discussion étaient proposés par les participants eux-mêmes. Outre ces séances inscrites à l'horaire, de nombreuses séances ont été organisées spontanément par les participants.

Voici les thèmes des discussions:
1. Le sens des observations absolues en géomagnétisme
2. Les champs magnétiques extérieurs
3. Le programme Maria/Canopus du CNRC
4. Le géomagnétisme dans les pays en voie de développement
5. Le variomètre idéal pour les observatoires magnétiques
6. Les données numériques d'un observatoire magnétique
7. Les degrés de précision dans les observatoires magnétiques.

Cette étude fournit un compte-rendu détaillé de l'atelier.

REMERCIEMENTS

R.L. Coles

En tant que président du Comité local d'organisation je désire remercier mes collègues de ce comité pour leur effort considérable et leur endurance au cours de la préparation de cet atelier et aussi pour les nombreuse heures subséquentes passées à la collecte et en traitement de données obtenues pendant la tenue de l'atelier. Je tiens également à remercier le personnel technique et de soutien du Laboratoire géomagnétique; leur effort a apporté une contribution majeure à l'atelier ce qui a été apprécié grandement par les participants. Sans l'enthousiasme de toute l'équipe l'atelier n'aurait pas atteint ce succès.

Au nom des participants à l'atelier et, plus particulièrement, du Comité d'organisation local, j'aimerais remercier Mmes Carole Jones et Patricia Scott ainsi que le personnel du Centre des conférences de l'Université Carleton pour l'aide précieuse que tous nous ont offerte. Leur expérience professionnelle nous a été d'un grand secours tant pour la préparation de l'atelier que pour le programme social, l'hébergement et les repas. Nous désirons aussi les remercier de la gentillesse dont tous ont fait preuve.

Je remercie tout les contributeurs de ce compte rendu sur l'atelier et aussi ceux qui ont revisé les efforts individuels. Je tiens particulièrement à remercier Larry Newitt, Benoit St-Louis et le groupe des rédacteur de la CGC pour la publication de cet ouvrage à l'occasion de cet atelier.

2. SCÈNE SCIENTIFIQUE

EXIGENCES SCIENTIFIQUES SUR LES DONNÉES D'OBSERVATOIRE GÉOMAGNÉTIQUE

E.R. Niblett et R.L. Coles

Introduction

L'observatoire magnétique de type courant fournit un enregistrement continu des variations temporelles du champ magnétique terrestre et des valeurs précises de la direction et de l'intensité de ce dernier à un endroit donné. Voici d'après Sucksdorff et coll. (1979) les caractéristiques fondamentales de l'observatoire magnétique:

1. permanence de fonctionnement, et
2. contrôle de la ligne de base des enregistrements des variomètres au moyen de mesures absolues du champ magnétique.

La permanence du fonctionnement ne veut pas dire que l'observatoire doit exister depuis l'époque de Gauss et qu'il doit être éternel. Concrètement, cela signifie qu'il doit fonctionner pendant une période suffisamment longue pour produire des moyennes annuelles du champ géomagnétique pouvant servir à calculer la variation séculaire. Dans les observatoires de type courant, on essaie normalement d'atteindre une précision de $\pm 0{,}1'$ pour les mesures de déclinaison et d'inclinaison, et de ± 1 nT pour la force totale. Les magnétogrammes classiques à trois composantes, analogiques et photographiques, à vitesse de déroulement normale de 20 mm/h, permettent de déterminer des variations magnétiques pour des périodes plus longues que 100 secondes environ. Les systèmes numériques modernes (comme ceux décrits ailleurs dans le présent compte rendu) peuvent produire des données à intervalle de 10 secondes ou moins, bien qu'il faille aussi des données à intervalle d'une minute pour rendre possible le stockage permanent des renseignements dans les centres mondiaux de données.

Une bonne part des recherches actuelles n'exigent pas une connaissance des valeurs absolues du champ; les chercheurs s'intéressent plutôt à l'analyse détaillée de la fréquence, de la phase, de l'amplitude et de la distribution des variations magnétiques. On peut citer entre autres des études de l'induction électromagnétique à l'intérieur de la terre et des études de la physique de la portion de la haute atmosphère qui renferme l'ionosphère et la magnétosphère. Akasofu et Kamide (1985) ont récemment examiné les applications des chaînes méridiennes de stations de variation dans l'étude des processus électromagnétiques dans le milieu proche de la terre. Les stations de variomètres sans contrôle de ligne de base fonctionnent généralement pendant un temps limité pour répondre aux besoins d'une expérience ou d'une campagne donnée, comme ce fut le cas pour l'Étude internationale de la magnétosphère (ÉIM) de la fin des années 70. Ces stations n'offrent ni la permanence ni les niveaux absolus qui sont les caractéristiques distinctives de l'observatoire magnétique du type courant.

Répartition des observatoires magnétiques de type courant

Chapman et Bartels (1940) ont établi qu'il existait 75 observatoires en 1933 (fig. 2.1), dont presque le tiers en Europe; les autres étaient éparpillés dans le reste du monde. Le réseau comportait de grands trous en Afrique, en Asie centrale, dans les régions polaires et bien entendu dans les océans. Sucksdorff et coll. (1979) ont relevé 210 observatoires magnétiques de type courant qui étaient exploités en 1978 (fig. 2.2), presque trois fois plus que 45 ans auparavant. La distribution de ces observatoires reste très irrégulière (fig. 2.3, 2.4 et 2.5) et a été gouvernée par des considérations politiques, financières et logistiques

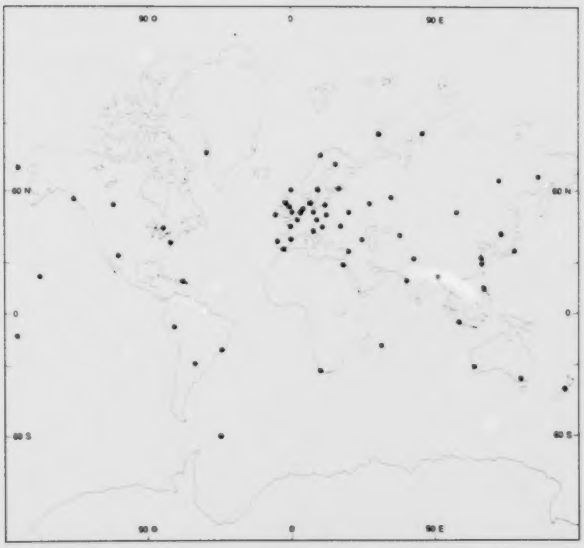


Figure 2.1 Distribution des observatoires géomagnétiques en 1933.

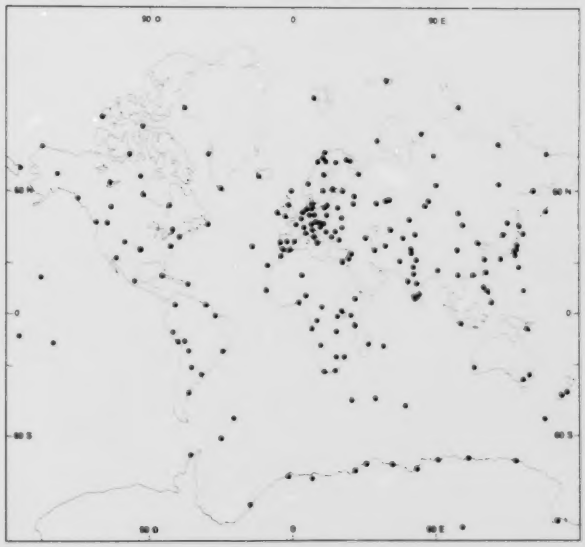


Figure 2.2 Distribution des observatoires géomagnétiques en 1978.

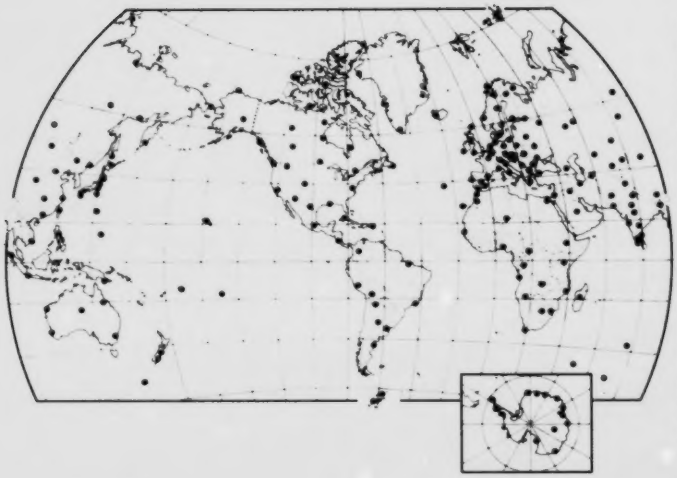


Figure 2.3 Distribution des observatories géomagnétiques en 1987.

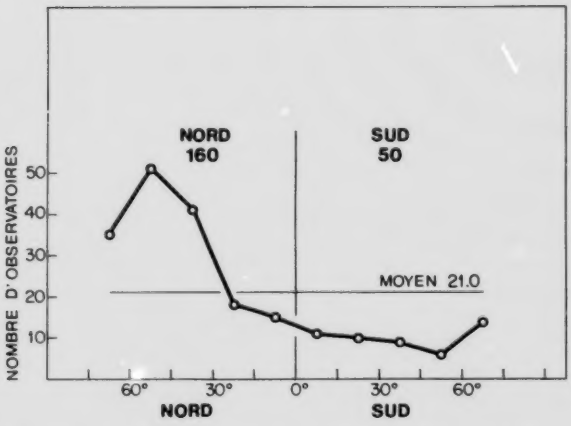


Figure 2.4 Distribution latitudinale des observatoires.

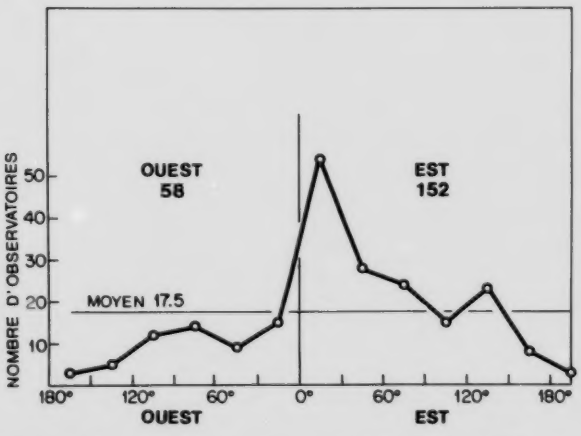


Figure 2.5 Distribution longitudinale des observatoires.

ainsi que par la nécessité d'obtenir des données scientifiques. Toutefois, le nombre de stations dans les régions polaires nord et sud a énormément augmenté pendant ces 30 dernières années en réponse aux demandes scientifiques pour des données géomagnétiques de hautes latitudes. Cet effort a été similé par l'Année géophysique internationale et les campagnes de satellites scientifiques qui ont permis d'établir les caractéristiques uniques des variations magnétiques dans les régions aurorales et polaires et l'importance de ces variations dans l'élaboration de modèles physiques de la structure et du comportement dynamique du système ionosphère/magnétosphère. La distribution mondiale des observatoires de type courant demeure encore avantageuse pour l'Europe, tandis qu'il reste des espaces importants sans observatoire dans certaines parties de l'Afrique, de l'Asie de l'Australie, du Groenland et de l'Amérique du Sud.

Données des observatoires magnétiques: besoins et applications scientifiques

Besoins pour lesquels les mesures absolues et le contrôle de la ligne de base sont importants.

1. Détermination des valeurs annuelles moyennes (et des niveaux calmes de référence) d'au moins trois composantes indépendantes du champ magnétique. Voici à quoi servent ces données:
   — calcul de la variation séculaire;
   — mise à jour des données des levés utilisées pour l'établissement des cartes magnétiques régionales et des représentations du champ mondial comme le Champ géomagnétique international de référence (IGRF);
   — analyse sphérique harmonique du champ principal de la terre, détermination des pôles géomagnétiques, de la composante dipôle, de la composante non dipôle et des caractéristiques de dérive connexes.

   La connaissance de la distribution et de la variation séculaire du champ magnétique principal à la surface de la terre est essentielle aux études de l'intérieur profond portant sur les propriétés physiques et les movements des fluides du noyau, la conductivité électrique du manteau inférieur et l'origine du champ géomagnétique (Chapman et Bartels, 1940; Bullard et coll., 1950; Rikitake et Honkura, 1985; ainsi que le programme de recherche SEDI (Étude de l'intérieur profond de la terre) soumis à l'UGGI).
2. Normalisation des boussoles et étalonnage des instruments magnétiques utilisés en navigation, en prospection géophysique et dans les levés aériens.
3. Comparaison des niveaux absolus du champ au sol avec les niveaux observés par satellites ou au moyen d'autres véhicules spatiaux. Ce type de comparaison est nécessaire pour la vérification de l'extrapolation vers le bas au niveau du sol des données transmises par satellites de façon à pouvoir les appliquer utilement à l'établissement de cartes magnétiques et au calcul de la variation séculaire. L'extrapolation vers le bas à partir des altitudes où se trouvent les satellites est compliquée à cause de la présence d'un flux de courant dans l'ionosphère.

4. Détermination des niveaux absolus non perturbés qui permettent de mesurer les phénomènes de perturbation (perturbations aurorales, champ magnétique interplanétaire (CMI), et effets à moyen et à long terme comme les variations Sq, L, Dst et les variations saisonnières). Ainsi, les variations de polarité du CMI qui sont le diagnostic des variations imminentes de l'activité des perturbations, peuvent être détectées dans des observations de haute latitude.
5. Réduction des valeurs des stations de répétition à une époque commune et correction des variations temporelles du champ géomagnétique dans les données des levés.
6. Etude des effets rémanents à long terme des orages magnétiques importants.

Besoins et applications scientifiques pour lesquels les mesures absolues du champ et le contrôle de la ligne de base ne sont pas nécessaires.

1. Étude de la distribution et de la morphologie des impulsions, des perturbations irrégulières, des orages magnétiques et, en bref, de toutes les variations magnétiques transitoires de courte durée.
2. Étude des relations entre les perturbations géomagnétiques et les phénomènes solaires.
3. Prévision de l'activité géomagnétique.
4. Calcul de K, Kp, Ap et d'autres indices d'activité géomagnétique importants dans des applications commerciales et militaires et fondamentaux dans les études scientifiques des courants ionosphériques, des aurores et de la dissipation de l'énergie dans le système ionosphère-magnétosphère.
5. Élaboration de modèles planétaires de la structure et du comportement dynamique de l'ionosphère et de la magnétosphère.
6. Étude de l'induction électromagnétique dans la terre ainsi que de la conductivité de la croûte et du manteau supérieur.
7. Élimination des données de levés aéromagnétiques des champs de courte période variant dans le temps.
8. Phénomènes associés aux champs de perturbation magnétiques, c'est-à-dire leurs effets sur les lignes de transport d'énergie, les pipelines, les radiocommunications et les véhicules spatiaux.

Aura-t-on encore besoin des observatoires magnétiques de type courant?

L'observatoire magnétique de type courant, exploité en permanence et fournissant des mesures soignées des valeurs absolues du champ, est depuis plus de 150 ans un instrument essentiel pour tenir à jour nos connaissances du champ principal et de sa variation séculaire. Les données enregistrées, les valeurs annuelles moyennes et les mesures du champ non perturbé qu'il permet d'obtenir servent à contrôler les mesures des stations de répétition ainsi que les levés répétés en station des levés au sol et aériens dont les résultats sont utilisés dans l'élaboration des cartes magnétiques et des modèles du champ mondial comme l'IGRF.

Ces travaux seront-ils nécessaires dans l'avenir? Avons-nous maintenant assez de connaissances sur la distribution du champ géomagnétique et sur sa variation séculaire pour envisager la fermeture des observatoires et pour exploiter plutôt des stations d'enregistrement temporaires ainsi que des mesures par satellite afin de répondre aux besoins futurs de la cartographie et de la recherche?

Les véhicules spatiaux comme le MAGSAT permettent de réaliser la saisie presque uniforme de données sur la majeure partie du globe terrestre et ont permis d'améliorer énormément la qualité de l'analyse du champ principal. D'après Cain et coll. (1983), les satellites permettent de contrôler la variation séculaire ainsi que les variations du champ externe s'ils sont exploités pendant un temps assez long. Toutefois, de telles mesures nécessitent un prolongement vers le bas à travers les régions E et F de l'ionosphère où les lois du champ potentiel ne sont plus généralement valables. En outre, les champs produits par des courants dans ces régions ne peuvent être différenciés par l'analyse sphérique harmonique du champ principal aux altitudes où se trouvent ces satellites. Il est donc difficile d'appliquer les mesures par satellites au problème de la cartographie du champ principal et de la variation séculaire à la surface terrestre, la pratique habituelle étant de rejeter toutes les observations sauf celles correspondant aux moments de moindre perturbation (Cain et coll., 1983). Il semble donc probable qu'un réseau mondial d'observatoires de type courant, sera encore nécessaire pour obtenir des mesures de référence précises du champ principal à la surface et pour en contrôler les variations à long terme.

La connaissance de l'intensité et de la configuration mondiale du champ géomagnétique est importante non seulement en cartographie magnétique et dans l'étude des processus physiques du noyau terrestre. Le champ dipôle influe aussi sur la structure, les propriétés électriques et le comportement dynamique de l'ionosphère et de la magnétosphère de la haute atmosphère. Lorsque la composante dipôle est infinitésimale (comme cela se produit fréquemment à l'échelle géologique pendant les périodes d'inversion de la polarité du champ magnétique), le système ionosphère/magnétosphère tel que nous le connaissons disparaît ou subit de profondes modifications. Ce milieu proche de la terre joue un rôle important dans la conversion du rayonnement cosmique et solaire en d'autres formes d'énergie. Par exemple, lorsque se produisent d'importants orages géomagnétiques et auroraux, d'énormes quantités d'énergie électromagnétique et thermique sont libérées dans la haute atmosphère polaire, ce qui se traduit par le passage de courants électriques intenses dans la magnétosphère et par le réchauffement par effet Joule de l'ionosphère à l'échelle mondiale. L'ionosphère agit comme une zone tampon qui protège la surface contre certains types de rayonnement, dont les rayons cosmiques primaires, et présente les conditions limites dans lequelles se fait la chimie des atomes ionisés qui régissent la composition de l'atmosphère. Elle est par conséquent importante à l'écologie d'un grand nombre de formes de la vie terrestre (Parkinson, 1982). Il se produit un réchauffement considérable dû aux particules de haute énergie et aux courants ionosphériques dans les régions D et E de l'atmosphère,

entre 70 et 130 km d'altitude. Ce réchauffement semble avoir un peu d'effet sur l'évolution quotidienne des conditions atmosphériques (bien que des études récentes laissent supposer que les effets pourraient être plus importants qu'on ne l'avait pensé), mais des changements climatiques à long terme sont possibles si l'ionisation et la conductivité électrique de ces régions de plasma subissent de très importantes modifications. La connaissance des tendances à long terme de l'intensification ou de l'affaiblissement du champ dipôle et de la carte mondiale de la perturbation géomagnétique est par conséquent importante pour l'étude du milieu près de la surface ainsi que pour la physique et la chimie de la haute atmosphère. Le Conseil international des unions scientifiques (CIUS) et ses membres préparent actuellement un programme multidisciplinaire connu sous le nom du Programme international de la géosphère et de la biosphère en vue d'étudier les complexes processus physiques, chimiques et biologiques du système Soleil-Terre qui déterminent les changements survenant dans ce système et qui sont des éléments déterminants de l'origine et du maintien de la vie sur la Terre.

Il ne faudrait pas perdre de vue que les observations magnétiques ont toujours fourni des données sur les variations magnétiques pour des études de l'aéronomie et de l'induction électromagnétique de la terre. Toutefois, ces observatoires sont généralement trop éloignés les uns des autres pour permettre une résolution adéquate des actuels systèmes de la haute atmosphère ou de l'intérieur de la terre. Pour cette raison, on ajoute souvent aux données des observatoires des données provenant de réseaux, de chaînes ou de branches très rapprochées de stations de variation magnétique en vue d'obtenir une couverture satisfaisante. On installe normalement ces stations durant une campagne pour un intervalle de temps prédéterminé qui dépend de la nature de l'expérience. Par exemple, il faut habituellement compléter les observations par satellite des champs, magnétique et électrique des différentes régions de la magnétosphère par des données obtenues simultanément au moyen de magnétomètres au sol pour la comparaison et l'interprétation des événements enregistrés. Des campagnes internationales comme l'ÉIM nécessitent plusieurs années d'observation et, à proximité de la zone aurorale où la magnétosphère est hautement structurée, des branches de stations de variation magnétique sont exploitées actuellement d'une façon semi-permanente (10 ans ou plus). On inclut dans ces réseaux de variomètres des observatoires magnétiques de type courant qui permettent de fournir des niveaux de référence absolus et des données sur les variations et dont la stabilité à long terme est garantie.

L'acquisition des données: le numérique ou l'analogique

Les considérations précédentes laissent bien voir qu'on a besoin des données des observatoires géomagnétiques, mais nulle part il n'est dit comment ces données devraient être recueillies.

Les progrès rapides de l'informatique pendant ces 30 dernières années ont eu une répercussion profonde, inéluctable, sur la façon dont nous enregistrons, stockons, utilisons et communiquons les données géomagnétiques. Certains pays, y compris le Canada, ont décidé de ne plus utiliser les vieux et fiables systèmes photographiques à aimant mobile et de les remplacer par des capteurs et des enregistreurs qui produisent et stockent leurs données numériquement. D'après une étude récente de Svendsen (communication personnelle, 1985), il existe actuellement dans le monde 73 observatoires à enregistrement numérique. Voici leurs avantages, évidents, exposés en détail par Serson (1977), Stuart (1984) et d'autres:

— Le stockage à long terme des données, dans une banque ou dans un centre mondial (CMD), et leur récupération ne nécessitent plus une conversion de la forme analogique à la forme numérique.
— Il est possible de mettre en oeuvre dans les observatoires des procédures automatisées d'acquisition de données qui exigent une moindre intervention humaine et dont les coûts d'exploitation sont donc moindres.
— Les données peuvent être transmises à partir de stations éloignées au bureau principal en temps presque réel grâce à des liaisons par satellite ou téléphoniques. Les données brutes peuvent être prêtes pour le traitement et l'analyse au fur et à mesure qu'elles arrivent.
— Les procédures quotidiennes de la mise en forme et du contrôle peuvent être exécutées à partir du bureau principal.
— La souplesse de la manipulation des résultats est considérablement accrue. Par exemple, un observatoire canadien fournissant des résultats numériques peut produire des données magnétiques à des intervalles d'une seconde ou plus sur commande; il peut aussi appliquer des algorithmes de filtrage et faire la moyenne pour fournir des valeurs pour des intervalles d'une minute conformes aux recommandations et au format de l'AIGA (Association internationale de géomagnétisme et d'aéronomie).

Mais il existe aussi des inconvénients:

— Les systèmes analogiques étaient autrefois assez normalisés dans le monde et les procédures étaient bien connues et bien comprises. Les instruments étaient fiables et ne nécessitaient qu'un faible réglage d'une année à l'autre. L'équipement numérique est complexe et coûteux, souvent difficile à réparer. Le matériel et le logiciel exigent des mises à jour fréquentes. À l'échelle mondiale, les instruments d'enregistrement numérique sont beaucoup plus diversifiés que ne l'étaient les anciens systèmes analogiques.
— Les mesures absolues manuelles seront toujours nécessaires dans les observatoires géomagnétiques, bien que les magnétomètres vectoriels à précession de protons et d'autres nouveaux types de magnétomètres puissent un jour réduire cet aspect de l'intervention humaine.
— On n'a plus besoin d'opérateurs hautement qualifiés dans les observatoires, mais il faut des ingénieurs électroniciens et des techniciens spécialistes au bureau principal pour faire marcher un réseau numérique. Ce type de personnel expérimenté dans les instruments géomagnétiques pourrait être difficile à trouver, surtout dans les pays en développement.

Dans un grand nombre de pays, les organismes qui exploitent les observatoires sont peu disposés à remplacer le système analogique par des instruments modernes numériques à cause de l'ampleur des investissements initiaux. Dans certains, il n'existe pas assez de techniciens hautement qualifiés pour qu'il soit possible de convertir les observatoires au numérique. Dans de tels cas, la question qui se pose est de savoir si on continue d'exploiter l'observatoire dans un mode analogique classique ou on doit le fermer complètement. Qu'il nous soit permis d'espérer qu'aucun pays ou organisme n'arrêtera l'exploitation d'un observatoire analogique simplement parce qu'il pense que son équipement est dépassé ou vieilli. Les données analogiques ont encore une très grande utilité dans les études du champ principal et de sa variation séculaire, pour lesquelles il n'est pas indispensable de mettre en oeuvre des méthodes automatisées d'acquisition, de transmission et de calcul. Les valeurs moyennes, horaires, quoditiennes et annuelles et les indices d'activité seront nécessaires pendant encore un grand nombre d'années, quelle que soit la façon dont on les obtient. De fait, la qualité générale de l'observation est souvent plus élévée dans un observatoire analogique bien tenu que dans un observatoire numérique, automatisé et moderne.

Cela dit, il faut reconnaître que les données numériques sont en demande toujours croissante chez les utilisateurs. Il semble inévitable que dans quelques années ni les utilisateurs scientifiques et commerciaux ni les organismes de collecte des données n'auront le temps ou les installations pour traiter des données analogiques. Il est par conséquent important que quiconque s'intéresse à l'avenir des observatoires magnétiques utilise tous les moyens possibles pour promouvoir et accélérer la conversion des données au numérique du réseau international.

Jankowski et coll. (1984) ont décrit une méthode permettant de modifier, au moyen de convertisseurs photoélectriques, les variomètres classiques à balance de torsion de type Bobrov pour qu'ils donnent des résultats électriques au lieu de résultats photographiques. Des modèles de ce type d'instrument ont été utilisés pendant l'atelier d'Ottawa, par le groupe polonais et finlandais et par le groupe hongrois (voir section 3). Ces magnétomètres à torsion photoélectriques (MTP) ont un niveau de stabilité et de rendement aussi élevé que celui de leurs systèmes mères photographiques, et la conversion est bon marché. La méthode fournit une solution pratique pour les observatoires magnétiques qui souhaitent passer au numérique mais qui n'ont pas les ressources pour acquérir et exploiter des systèmes plus perfectionnés complètement automatiques utilisant des principes physiques différents.

Précision

Les données obtenues des observatoires magnétiques de type courant doivent permettre d'établir des cartes magnétiques, la variation séculaire et des représentations du champ total par analyse sphérique harmonique. De longues séries continues de valeurs moyennes horaires ont aussi permis de déterminer les coefficients harmoniques des variations quotidiennes solaires et lunaires et d'autres effets de longue période. Pour toutes ces applications, une précision de 1 nT pour la mesure absolue de l'induction magnétique et de 0,1′ pour la déclinaison et l'inclinaison s'est révélée généralement satisfaisante. Toutefois, les valeurs de la ligne de base à n'importe quel moment donné sont généralement moins précises à cause des dérives des instruments provoquées par les variations de température, les oscillations du pilier et d'autres phénomènes perturbateurs. Ainsi, les valeurs moyennes horaires, bien que généralement données au nT le plus proche ou au dixième de minute d'arc le plus proche dans les rapports des observatoires, présentent rarement une telle précision. Une précision de 2 à 5 nT est peut-être plus représentative pour la plupart des endroits, à moins qu'on ait prévue un rigoureux programme de mesures absolues. Les difficultés classiques de cartographie et scientifiques classiques susmentionnées ont été surmontées grâce à l'acquisition de données à cette précision et avec une vitesse de déroulement analogique normale de 20 mm/h. Toutefois, des études de « rampes subites » et d' « impulsions » de la variation séculaire et des effets du cycle solaire ont montré le besoin d'une précision absolue de l'ordre de 1 nT (par exemple Alldredge 1982).

Des instruments absolus offrant des précisions de mesure de l'ordre de 1 nT ou 0,1′ existent depuis plusieurs décennies et servent par conséquent d'étalon commode dans un réseau à l'échelle mondiale. Toutefois, pour le contrôle des variomètres enregistreurs il est généralement nécessaire de combiner plusieurs mesures absolues afin d'obtenir, par conversion, la composante à enregistrer. Par exemple, la normalisation de la ligne de base d'un variomètre de mesure de Z exige généralement des mesures absolues de F (magnétomètre à précession de protons) et de I (sonde à vanne de flux de mesure de D et I); les valeurs calculées de Z seront moins précises que chacune des valeurs mesurées. Des mesures de comparaison détaillées faites avec une sonde à vanne de flux de D et de I, deux déclinomètres à quartz et un magnétomètre vectoriel à précession de protons ont été rapportés; par Kring Lauridsen (1985). D'après ces expériences et d'autres expériences de comparaison, ce dernier a conclu qu'il est extrêmement difficile, étant donné les instruments dont on dispose actuellement, d'atteindre une précision plus élevée que 1 nT dans les mesures absolues. Dans des régions de haute latitude, on devrait accepter une précision moindre pour les mesures de déclinaison car la composante horizontale du champ est relativement faible et fortement variable.

Il existe depuis quelques années des instruments à pouvoir de résolution de l'ordre du picotesla. Parmi ces instruments, on peut citer les magnétomètres cryogéniques, les magnétomètres à vapeur de rubidium, les magnétomètres au césium et les sondes à vanne de flux à noyau annulaire. Ce sont d'excellents capteurs pour des systèmes spécialisés d'enregistrement haute résolution mais qui n'ont pas trouvé une application très utile comme instruments absolus (ou quasi absolus) de haute précision dans les observatoires magnétiques. La combinaison d'une sonde à vanne de flux à noyau annulaire et d'un magnétomètre à précision de protons de haute qualité peut avoir une stabilité suffisante pour permettre d'améliorer la précision des mesures absolues, et de ramener à une valeur plus petite que 1 nT.

La mise à niveau est un problème permanent des instruments absolus, quelle que soit leur précision magnétique. Pour les techniques classiques, on se fiait énormément à l'habilité et au sérieux de l'opérateur ainsi qu'à la sensibilité des niveaux à bulle. Les techniques progressant, l'utilisation de clinomètres d'une précision suffisante et d'une stabilité à long terme, combinés à des capteurs d'azimut, deviendra bientôt réalité.

Soutien continu pour les observatoires magnétiques.

Un peu tout le monde se préoccupant davantage des dépenses publiques, de plus en plus d'observatoires magnétiques et leurs organismes directeurs tombent sous le coup des restrictions budgétaires. On a essayé dans la présente étude d'examiner les nombreux et divers domaines de la science et de la technique qui dépendent des données géomagnétiques puis d'indiquer le type de contribution que les observatoires magnétiques ont apporté aux connaissances fondamentales se rapportant à la terre et aux applications pratiques comme la navigation, les levés, la cartographie et la prospection géophysique.

L'idée d'un réseau mondial a germé quand Von Humboldt a organisé des observations magnétiques simultanées largement distribuées aux début du 19e siècle, et s'est concrétisée quand a été formée l'Union magnétique de Gottingen en 1834, par Gauss et Weber. Depuis, le progrès continu de ce réseau a été stimulé par des méthodes et des instruments améliorés (l'enregistrement photographique a été introduit pour la première fois en 1847), par d'importants programmes internationaux comme les Années polaires, l'AGI et l'ÉMI ainsi que par une plus grande prise de conscience de la valeur scientifique des données. Dans l'avenir, un réseau complet, bien instrumenté, sera essentiel pour les satellites de levés géomagnétiques, le programme international de la géosphère et de la biosphère ainsi que pour toutes les nouvelles initiatives scientifiques qui s'intéressent à la structure et à la dynamique de la terre et au système Terre-Soleil. Il faut espérer que les projeteurs de ces nouveaux programmes continueront à reconnaître la valeur des observatoires magnétiques et trouveront des moyens pour apporter l'appui financier et les ressources humaines nécessaires pour garder en exploitation un réseau mondial bien équipé.

Bibliographie

Alldredge, L.R.
1982: Geomagnetic models and the solar cycle effect; Reviews of Geophysics and Space Physics, v. 20, no. 4, p. 965-970.

Akasofu, S.-I. et Kamide, Y.
1985: Meridian chains of magnetometers as a powerful "remote sensing" tool in determining electromagnetic quantities in the ionosphere on a global scale; EOS, Transactions of the American Geophysical Union, v. 66, no. 22, p. 465-466.

Bullard, E.C., Freedman, C., Gellman, H.,et Nixon, J.
1950: The westward drift of the earth's magnetic field; Royal Society of London, Philosophical Transactions, Series A, v. 243, no. 859, p. 67-92.

Cain, J.C., Frayser, J., Muth, L., et Schmitz, D.
1983: The use of Magsat data to determine secular variation; Journal of Geophysical Research, v. 88, p. 5903-5910.

Chapman, S. et Bartels, J.
1940: Geomagnetism; vol. 1, Oxford University Press.

Jankowski, J., Marianiuk, J., Ruta, A., Sucksdorff, C., et Kivinen, M.
1984: Long-term stability of a torque-balance variometer with photoelectric converters in observatory practice; Geophysical Surveys, v. 6, p. 367-380.

Kring Lauridsen, E.
1985. Experiences with D-I fluxgate magnetometer inclusive theory of the instrument and comparison with other methods; Danish Meteorological Institute, Geophysical Papers No. R-71.

Parkinson, W.D.
1982: Introduction to Geomagnetism; Elsevier Science Publishing Co.

Rikitake, T. et Honkura, Y.
1985: Solid Earth Geomagnetism; Terra Scientific Publishing Company, Tokyo, Japan.

Serson, P.H.
1977: Digital recording and telemetry of magnetic observatory data; (Abstract) IAGA symposium on magnetic observatory practice, Seattle, USA. EOS, Transactions of the American Geophysical Union, v. 58, p. 776.

Stuart, W.F.
1984: Introduction, Workshop on Geomagnetic Observatory and Survey Practice; Geophysical Surveys, v. 6, p. 217-220.

Sucksdorff, C., Nevanlinna, H., et Svendsen, K.L.
1979: Geomagnetic observatories 1978; Report SE-21, World Data Center A for Solid Earth Geophysics, Boulder, Colorado.

3. INSTRUMENTS UTILISÉS À L'ATELIER

Tableau 3.1 Liste des instruments

AMOS III EPB	CGC EMR Ottawa
vanne de flux D et I EPB	CGC EMR Ottawa
AMOS III EDA	EDA inc.
vanne de flux FM100B	EDA Inc.
PPM OMNI IV	EDA Inc.
vanne de flux D et I DIM-100	EDA Inc.
PPM vectoriel Elsec 8200	Littlemore Scientific
PPM Elsec 820	Littlemore Scientific
vanne de flux D et I Elsec 810	Littlemore Scientific
magnetometre a noyau annulaire saturable	Narod geophysics
observatoire automatique	USGS
magnetometre photoelectrique a torsion	Inst. de geophysique, Pologne institut meteorologique finlandais
magnetom. a quartz DIMARS	Institut Eotvos, Hongrie
vanne de flux D et I	Institut meteorologique royal neerlandais
vanne de flux D et I	Inst. meteorologique danois
inducteur terrestre de Sokkisha	Observatoire magnetique de Huancayo
PPM GSM10 (Overhauser)	GEM
PPM GSM11 (Overhauser)	GEM
PPM GSM18	GEM
PPM GSM8	GEM
PPM GSM9 (Overhauser)	GEM
magnetom. a noyau annulaire saturable SAM-3	Dowty
magnetom. a noyau annulaire saturable TAM3	Dowty
magnetom. differentiel triaxial	Dowty
magnetom. a vapeur de cesium	Scintrex
magnetometre a protons	Scintrex
magnetometre vectoriel a vanne de flux	Scintrex
vanne de flux D et I	Inst. de phys. du globe
magnetometre triaxial a vanne de flux	Inst. de phys. du globe Thomson-Sintra

LES INSTRUMENTS DE LA COMMISSION GÉOLOGIQUE DU CANADA

Les instruments et les systèmes de la CGC utilisés à l'atelier ont été décrits précédemment dans les publications (Trigg, 1970; Andersen, 1973, 1974; Trigg et Nandi, 1984; Jansen van Beek et al., 1986). Dans le but d'alléger le texte, leur description se limitera à un bref résumé.

L'enregistrement numérique automatique des données magnétiques dans les observatoires géomagnétiques canadiens a débuté en 1969. Le système a par la suite été appelé AMOS I (pour « Automatic Magnetic Observatory System », Système d'observatoires magnétiques automatiques); il a été décrit en 1974 par Andersen. Les composantes orthogonales X, Y et Z sont calculées à partir des données fournies par trois capteurs à vanne de flux montés dans des bobines de Helmholtz. Une paire de bobines annule en permanence la composante principale horizontale. La deuxième paire annule la composante Z, ce qui permet à la vanne de flux de fonctionner dans un champ relativement faible (inférieur à 15 % du champ total), quelle que soit la station. F est mesuré par un magnétomètre à protons.

AMOS I est maintenant remplacé par AMOS III. AMOS III (fig. 3.1), qui comporte des améliorations dans les domaines de l'électronique et de l'informatique, a été conçu et réalisé par la Direction de la physique du Globe, Ottawa.

La conception du système AMOS III avait pour objectif d'intégrer les magnétomètres AMOS existants dans un système basé sur une unité de commande de micro-ordinateur, permettant ainsi une amélioration du recueil des données numériques, du contrôle du système et des fonctions de diagnostic. AMOS III a été décrit en détail par Trigg et Nandi (1984). Dans ce système, les signaux analogiques fournis par chaque magnétomètre à vanne de flux sont appliqués à l'entrée de trois voltmètres analogiques indépendants. Une fois par minute, le système met en mémoire les valeurs numériques filtrées de X, Y et Z ainsi que la valeur de F, jusqu'à ce que le nombre de données recueillies soit suffisant pour enregistrer un bloc de données sur l'enregistreur à cartouche magnétique. Le logiciel d'AMOS III utilise deux algorithmes de filtrage. Le mode de calcul analytique détaillé des réponses à été décrit par Coles (1983).

Le raccordement d'un terminal de données ou d'un ordinateur personnel par l'intermédiaire d'une interface série RS-232C intégrée au micro-ordinateur permet à l'opérateur d'assurer une grande partie du contrôle du système. Cette technique représente une amélioration considérable des possibilités de contrôle du système avec l'utilisation du téléphone système TVS décrit par Andersen (1973) et mis en oeuvre sur AMOS I. Le TVS d'AMOS III a été décrit par Trigg et Nandi (1984). Le micro-ordinateur peut garder en mémoire les informations de diagnostic pendant une période pouvant aller jusqu'à 5 jours.

Le magnétomètre de D et I à vanne de flux a été décrit par Trigg (1970); il sera examiné plus en détail à la section 4 du présent compte rendu.

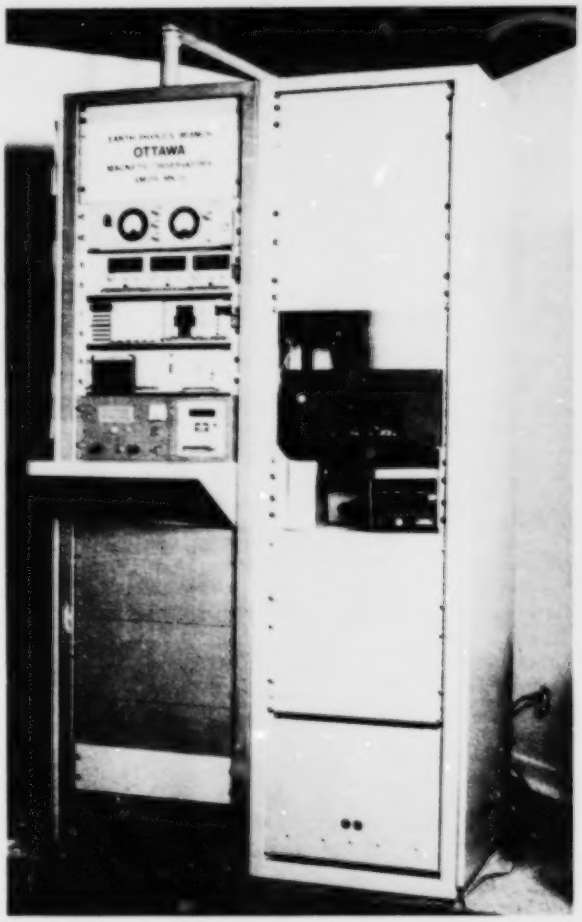


Figure 3.1 Le système AMOS III de l'observatoire d'Ottawa de la Commission géologique du Canada.

Bibliographie

Andersen, F.
1973: Telephone verification system for automatic magnetic observatories; Publication de la Direction de la Physique du globe, v. 44, N° 5, Ottawa.
1974: An automatic observatory system; Publication de la Direction de la Physique du globe, v. 44, N° 11, Ottawa.

Coles, R.L.
1983: Response functions for AMOS III digital filters; Rapport interne 83-2, Direction de la physique du Globe, Division de sismologie et de géomagnétisme, Ottawa.

Jansen van Beek, G., Coles, R.L., and Newitt, L.R.
1986: Rapport annuel sur les observatoires magnétiques — 1984; Série géomagnétisme n° 30, Direction de la physique du Globe, Ottawa.

Trigg, D.F.
1970: A portable D&I magnetometer; Rapport 70-3, Direction de la physique du Globe, Ottawa.

Trigg, D.F., et Nandi, A.
1984: The Automatic Magnetic Observatory System AMOS III; Série géomagnétisme n° 27, Direction de la physique du Globe, Ottawa.

EDA INSTRUMENTS CORPORATION, CANADA

Tim Dobush, Paul Smith, et Bill Griffith.

Magnétomètre de déclinaison et d'inclinaison EDA DIM-100

Spécifications

Valeurs mesurées:	valeur absolue de l'angle de déclinaison et d'inclinaison par rapport au nord géographique
Technique:	capteur à vanne de flux de zéro et parallèle à l'axe optique d'un théodolite non-magnétique.
Justesse:	±3″ à partir de deux positions de la lunette (erreur quadratique moyenne)
Détecteur de champ zéro:	cadran de −15 nT à +15 nT
Plage de température:	−40°C à +50°C
Alimentation:	interne, 4 piles D6, ±18 V
Théodolite:	Zeiss/Jena 020A
Lunette:	image redressée
Stabilisation automatique de l'index vertical:	justesse moyenne du réglage: ±1″
Sensibilité du niveau de la platine:	niveau tubulaire 30″ pour 2 mm de deplacement de la bulle
	niveau circulaire 8′ pour 2 mm de déplacement de la bulle
Fil à plomb optique:	justesse du centrage, de ±0,3 mm à 1,5 m
Cercles horizontaux et verticaux:	diamètre de 86 mm, échelle graduée aux minutes permettant d'estimer 0,1′

Magnétomètre à vanne de flux FM100B et FM100C

Spécifications

Valeurs mesurées:	variations du champ magnétique selon les trois directions orthogonales
Technique:	capteurs à vanne de flux de grande sensibilité, orientés, avec zéro ramené au niveau du champ ambiant
Plage de mesure	
FM100B, X et Y	0 à 40 000 nT (deux gammes)
Z	0 à 70 000 nT (deux gammes)
FM100C, X et Y	0 à 40 000 nT
Z	0 à 70 000 nT
Résolution	
FM100B	0,4 nT
FM100C	0,4 %
Sensibilité:	
FM100B	100 nT/V
FM100C	10 000 nT/V (10 nT/mV)
Réglage du zéro:	trois potentiomètres de précision à blocage gradués de 0 à 1 000, montés sur panneau.
Ajustement du zéro:	
FM100B	échelle graduée de −500 à +500
FM100C	échelle graduée de −5 000 à +5 000
Plage dynamique:	
FM100B	±1 000 nT (10 V) par rapport à la ligne de base
FM100C	±100 000 nT (10 V) par rapport à la ligne de base
Enveloppe du bruit de fond:	inférieure à 0,2 nT
Réponse en fréquence:	
FM100B	moins de 3 dB de 0 à 4,0 Hz
FM100C	moins de 3 dB de 0 à 5,0 Hz
Coefficient de température:	inférieur à 1 nT/°C
Plage de température:	−40 à +50 °C
Signaux de sortie:	trois tensions de ±10 V, ±5 mA de résistance inférieure à 0,2Ω
Alimentation:	4 W, 115/230 V c.a.; ou ±90 mA, à ±14-28 V c.c.
Justesse du niveau de la tête du capteur:	450″ par division.

Magnétomètre à autocorrélation EDA OMNI IV

Le magnétomètre à protons EDA OMNI IV est commandé par microprocesseur; il est conçu pour fonctionner dans quatre modes différents:

1. magnétomètre à autocorrélation,
2. magnétomètre portatif,
3. magnétomètre enregistreur de station de base,
4. gradiomètre simultané (avec un second capteur).

Spécifications

Plage dynamique:	18 000 à 110 000 nT
Méthode de réglage:	la valeur de réglage est calculée avec justesse à l'aide d'un algorithme de réglage destiné spécialement à cet usage
Réglage fin automatique:	±15 % de la dernière valeur mise en mémoire du champ magnétique ambiant
Résolution d'affichage:	0,1 nT
Sensibilité de traitement:	±0,02 nT
Résolution d'erreur statistique:	0,01 nT
Précision absolue:	±1 nT sur 50 000 nT à 23°C ±2 nT pour l'ensemble de la plage de température
Mémoire standard:	jusqu'à 5 000 blocs de données en mode de station de base

Affichage:	cristaux liquides à six chiffres et moniteurs
Interface RS-232:	2 400 bauds, 8 bits, 2 bits d'arrêt, pas de parité
Tolérance de gradient:	6 000 nT/m
étapes du cycle:	programmable de 5 secondes à 60 minutes en mode de station de base
Conditions de fonctionnement:	−40 à +50°C humidité entre 0 et 100 % à l'épreuve des intempéries
Alimentation:	accumulateurs non magnétiques au plomb ou Ni-Cd, ou batteries non rechargeables ou alimentation 12 V c.c. pour une station de base

Système d'observatoire magnétique automatique EDA AMOS III

Spécifications

Magnétomètre à vanne de flux: FM-100C — trois composantes modèle décrit ci-dessus

Magnétomètre à protons PPM-105

Sensibilité:	version standard: 0,1 nT; 0,01 nT en option
Plage dynamique:	18 000 à 99 000 nT
Réglage:	réglage approximatif manuel, réglage précis par microprocesseur
Coefficient de température:	inférieur à 5 ppm de −10 à +40°C
Signaux de sortie:	trois gammes analogiques se chevauchant et sortant simultanément, BCD à six chiffres et visualisation sur le panneau avant par 6 chiffres à cristaux liquides
Capteur:	type à faible inductance, avec annulation du bruit et réglage par microprocesseur; câble standard de 100 m

Unité centrale CPU-130

Horloge pilote digitale:	précision de 0,000 1 %
Microprocesseur:	COSMAC
Commande interactive de l'opérateur:	bloc de 24 touches plus touche de validation (ENABLE)
Convertisseur A/D:	résolution de 1 nT, justesse de ±1 nT
Interface de communication:	RS-232C, 300 à 9 600 bauds; boucle de courant de 20 mA, 110 bauds
Affichage:	Trois affichages LED à 6 chiffres, sélectionnées par commutateur, pour les composantes X, Y et Z
Mémoire:	mémoire interne RAM et PROM 36K octets
Taux d'échantillonnage:	réglé normalement à 1 par minute, 10 jeux de données par enregistrement; échantillonnage rapide, intervalle réglable de 1 à 30 secondes
Longueur des enregistrements:	336 caractères BCD par enregistrement, 620 caractères par enregistrement en échantillonnage rapide
Paramètres mesurés et calculs:	composants X, Y et Z en nT; F en 0,1 nT; résultante F calculée à partir de X, Y et Z; températures des quatre transducteurs à 0,1 °C près; année, jour, heure, minute et seconde (uniquement pour l'échantillonnage rapide); identificateur de station; moyenne sur une heure; maximum et minimum sur une heure; 22 codes d'erreurs et rapports de diagnostic

Enregistreur sur bande magnétique MTR-125

Bande:	8,5 po, 800 bits au pouce
Capacité:	4 mois pour le programme d'exploitation standard

Alimentation PSB-350

Entrée:	120 V, 60 Hz ou 240 V, 50 Hz
Sortie:	tensions stabilisées c.a. et c.c.
Alimentation de secours:	autonomie de 8 heures à partir des accumulateurs au plomb scellés montés à l'intérieur

INSTRUMENTS LITTLEMORE (LITTLEMORE SCIENTIFIC ENGINEERING CO., R.-U.)

Cyril Chapman

Observatoire magnétique automatique ELSEC 8200

(Cet instrument est la propriété d'Énergie, Mines et Ressources Canada, qui a gracieusement donné la permission de l'inclure dans le programme.)

L'ELSEC 8200 (également connu sous le nom de PPM vectoriel Littlemore) est un système permettant d'enregistrer de manière entièrement automatique le champ total et les variations des angles de déclinaison et d'inclinaison. Le système est constitué d'un seul capteur à protons monté dans une paire de bobines d'Helmholtz (fig.3.2) et d'une unité électronique qui commande le magnétomètre et le courant dans les bobines. Le système fournit une mesure complète toutes les 30 secondes avec une résolution de 0,1 nT. Les résultats sont affiché sur l'unité électronique et peuvent être recueillis sur trois canaux analogiques; l'unité comporte également une sortie numérique RS-232 pour l'enregistrement.

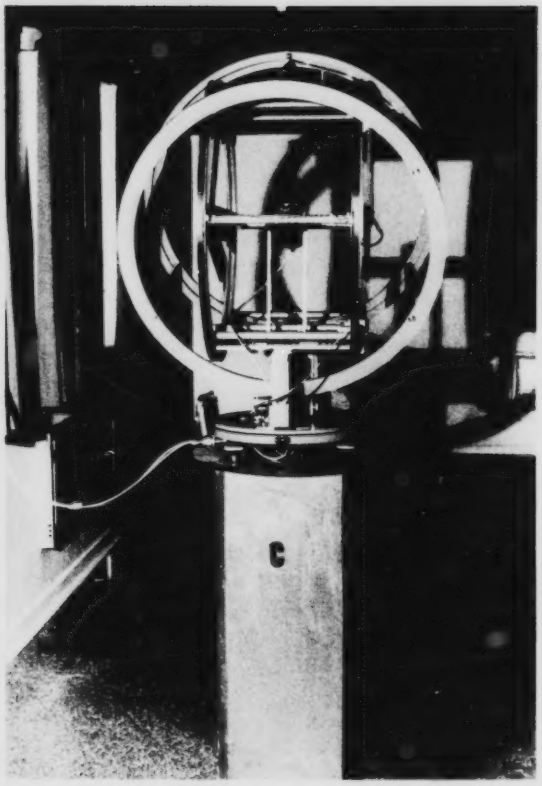


Figure 3.2 Le magnétomètre vectoriel à protons Littlemore ELSEC 8200 de l'observatoire d'Ottawa.

Utilisé en conjonction avec un instrument à vanne de flux monté sur théodolite (ELSEC 810 par ex.) pour la détermination absolue de D et de I, l'ELSEC 8200 constitue un système complet de variomètre pour les observatoires magnétiques dont les signaux, une fois traités, peuvent être exprimés sous d'autre formes, par exemple D, H et Z.

Magnétomètre à protons ELSEC 820

Ce magnétomètre a une sensibilité de 0,1 nT et une large gamme de modes de fonctionnement qui permettent son intégration dans les observatoires magnétiques à systèmes digitaux. Les lectures peuvent être déclenchées par une horloge ou un interrupteur externe ou par l'intermédiaire de l'interface RS-232. Les données peuvent être stockées à l'intérieur de l'instrument, ou transmises à un autre dispositif sous forme de données analogiques ou série. Le réglage peut être effectué à partir d'un ordinateur extérieur par l'intermédiaire de l'interface RS-232, ce qui permet d'utiliser cet instrument pour des mesures vectorielles automatiques.

Théodolite D et I à vanne de flux ELSEC 810

Cet instrument combine un théodolite non magnétique de précision et un élément à vanne de flux de haute sensibilité monté de façon à ce que son axe magnétique soit confondu avec l'axe optique du théodolite. L'unité électronique comporte un affichage de 3 chiffres et demi qui peut être utilisé comme indicateur de zéro pour la mesure absolue de D et de I. L'affichage numérique permet également de lire les composantes H et Z si on adjoint au théodolite un magnétomètre à protons servant de référence.

MAGNÉTOMÈTRE À NOYAU ANNULAIRE SATURABLE S-100 DE NAROD GEOPHYSICS LTD.

Barry Narod

Introduction

L'impulsion initiale a été fournie par le US Geological Survey qui avait besoin de magnétomètres compacts de faible consommation pour utilisation au fond de la mer et dans des installations terrestres temporaires. L'instrument S-100 décrit ci-après est le produit de ce développement.

Le capteur de ce magnétomètre utilise trois noyaux annulaires saturables S-1000-C310JC-2239 d'Infinetics Inc. comme éléments à perméabilité variable pour la mesure de chacune des trois composantes vectorielles. Un haut degré de stabilité thermique a été réalisé en fabriquant toutes les pièces de support des bobines en céramique usinable (MACOR). Le capteur ressemble à celui développé par Mario Acuna à la NASA pour MAGSAT.

L'instrument S-100 comprend trois cartes de circuit imprimé. La carte principale regroupe tous les circuits nécessaires pour l'excitation des noyaux annulaires, le décalage du champ principal et l'amplification des signaux d'erreur du capteur. Cette carte comprend également les circuits d'entrée-sortie du S-100, qui permettent à l'unité centrale d'inscrire, par l'intermédiaire du bus du S-100, des valeurs de décalage dans la mémoire de la carte, pour assurer le contrôle automatique du décalage.

Les deux autres cartes sont la carte de commande de bus, qui comprend les comparateurs analogiques et le microprogramme de mise en oeuvre du contrôle automatique de décalage, et un filtre anticrénelage à trois canaux. Les trois cartes et le capteur constituent un instrument triaxial analogique autonome. La carte du contrôleur est enlevée lorsque l'application, au fond de la mer ou sur terre, comporte un enregistreur de données. Sa fonction est alors assurée par le numériseur et l'unité centrale de l'enregistreur de données.

Critères de conception

Les critères de conception peuvent se résumer comme suit:

1. Généralités
   - — complexité et puissance consommée minimales
   - — cartes électroniques conformes aux spécifications mécaniques IEEE-696 (S100), exception faite de l'épaisseur, ainsi qu'aux normes électriques applicables dans la mesure du possible.

2. Carte de l'électronique du magnétomètre
   — assure les interfaces entre le capteur et le reste de l'instrument
   — configurée sous forme de 7 emplacements d'entrée-sortie à écriture seule sur le bus S100
   — accepte des informations de décalage numérique pour chacun des trois canaux
   — fournit trois signaux de sortie analogiques de variomètre, sans tampon ni filtre, avec une largeur de bande de 50 Hz: 1,0 V pour 100 nT
   — l'électronique de base du magnétomètre à trois composantes (sans filtres de sortie analogiques ni fonction de commande de décalage) occupe une carte complète.
3. Spécification du filtre anticrénelage
   — choix 0,1 Hz ou 0,5 Hz pour la fréquence de coin
   — filtre 3 canaux
   — filtre à trois pôles
   — fonction de rectification maximale de l'amplitude (Butterworth)
   — sortie de faible impédance avec tampon
   — gain unitaire
4. Spécification de la carte du contrôleur
   — basée sur un microprocesseur CMOS CDP1802
   — six comparateurs règlent les tensions à ±3,1 V pour la fonction de commutation automatique de gamme, appliquées sur J2 de la carte du magnétomètre.
   — logiciel entièrement commandé par interruptions pour une consommation minimale de courant
   — données de 9 bits, complément à 2 disponibles pour les trois canaux sur J1; nombre binaires compris entre −246 et +246
   — conversion +12 V à −12 V disponible sur la carte.

Spécifications du système

— mesure des trois composantes du champ
— résolution du variomètre: 0,01 nT pour les trois axes
— incrément nominal de variation du champ de décalage: 327,68 nT plage de décalage entre ±256 × 327.68 nT
— alimentation par batteries de tension nominale ±12 V
— deux systèmes de configuration possibles pour les composants:
   — sous-système OBM
   — version autonome

Spécifications (carte et capteur du magnétomètre)

Largeur de bande:	−3 dB à 50 Hz, pente de diminution de deuxième ordre
Sensibilité:	100 nT/V
Plage du signal de sortie:	±10 V
Plage de décalage:	±70 000 nT
Stabilité du décalage (capteur et électronique):	meilleure que 0,010 nT/jour ±10 ppm/°C (valeur estimée)
Stabilité du décalage (capteur seul):	±1 ppm/°C (valeur estimée)
Justesse du décalage:	±5 % (valeur estimée)
Bruit de fond (signal d'entrée équivalent):	densité spectrale de puissance en 1/f: inférieure à 5 × 10-5 nT2/Hz à 1 Hz (inférieure au seuil de détection du système de mesure)
Dérive du zéro (électronique seulement):	inférieure à 0,07 nT/°C
Alimentation:	±12 V. ±35 mA, stabilisée à +20 %, −10 %
Données de décalage sur les ports de sortie:	S-100/IEEE-696, 7 portes séquencées
Longueur maximale du câble du capteur:	10 m ou plus de 150 m avec câbles spéciaux
Commentaires:	la stabilité du décalage peut être portée à ±5 ppm/°C pour l'électronique si l'on peut tolérer une consommation plus élevée (pertes Joule dans les diodes Zener de référence).

SYSTÈME D'OBSERVATOIRE AUTOMATIQUE DE L'USGS

A.W. Green, Jr., J.B. Wood et L.R. Wilson

Le système utilise un magnétomètre à vanne de flux à noyau annulaire saturable pour fournir des données de grandes qualité sur les variations des trois composantes magnétiques. La vanne de flux à noyau annulaire et autocompensation a été sélectionnée pour sa résolution élevée, l'excellente stabilité de sa ligne de base et la possibilité de modifier automatiquement son niveau de compensation en fonction des variations du champ. Ce nouveau magnétomètre, développé en collaboration avec l'Université de Colombie-Britannique et le Centre géoscientifique du Pacifique de la Commission géologique du Canada, a une résolution de 0,1 nT et un coefficient de température inférieur à 0,1 nT par °C. La nouvelle vanne de flux comprend également un détecteur de niveau, un compteur-décompteur et un convertisseur analogique/numérique qui donne des champs de compensation pour chacune des composantes par incréments de 327,68 nT.

Le signal de sortie analogique délivré pour chaque composante est une tension proportionnelle à la variation du champ magnétique par rapport au niveau de compensation. Si cette variation dépasse 327.68 nT dans un sens ou dans l'autre, le circuit d'autocompensation change automatiquement le niveau de compensation dans le sens approprié par incréments de 327,68 nT. L'instrument fournit également, pour chaque composante, un signal de sortie numérique constitué par un mot binaire de 9 bits qui désigne le niveau de compensation, le « chiffre binaire de compensation » (CBC). Par exemple, un CBC de +010011101 (+157) et une tension de −1,6591 V pour la composante Z correspondent à un champ selon l'axe des Z égal à 157 × 327,68 − 165,91 = 51 279,85 nT.

Bien que la vanne de flux à noyau annulaire saturable soit un magnétomètre très stable, il ne s'agit pas d'un instrument absolu. On utilise un magnétomètre à protons à haute sensibilité, le PPM 105, monté avec une bobine de compensation orthogonale, pour procéder quotidiennement à des mesures quasi absolues. Le magnétomètre à protons et les bobines de compensation fournissent un moyen de corriger périodiquement les valeurs de ligne de base donnés par le capteur à vanne de flux à noyau annulaire et d'obtenir des valeurs quasi absolues des composantes du champ magnétique.

Au moment de la mise en place de la station, on procède à une mesure minutieuse des angles d'inclinaison et de déclinaison des axes du système de bobines de compensation. Théoriquement, si l'alignement des axes n'est pas modifié, le système reste absolu (si l'on ne tient pas compte de l'erreur de mesure proprement dite). En pratique, cependant, l'alignement des bobines n'est pas absolument fixe et on doit procéder à une vérification périodique de l'alignement du système. Si cet alignement varie d'une façon linéaire ou systématique, par exemple, du fait de l'enfoncement ou de l'inclinaison du pilier, on peut procéder à des corrections permettant de conserver des valeurs quasi absolues dans des limites acceptables.

Les données géomagnétiques fournies par la station peuvent être transmises pratiquement en temps réel par l'intermédiaire de satellites de télécommunications. Elles peuvent également être enregistrées sur des cartouches magnétiques à la station éloignée.

Les données transmises (ou enregistrées) sont les suivantes:

1. Les valeurs, fournies toutes les 5 secondes, des variations d'amplitude des composantes H, D et Z (ou X, Y et Z) par rapport à leurs lignes de base respectives de compensation. La plage de variation est de ±327,68 nT avec un incrément de comptage de 0,01 nT.
2. Le niveau de la ligne de base de compensation, toutes les 5 secondes, pour chacune des trois composantes. (Il existe 512 niveaux distants de 327.68 nT pour chacune des composantes.)
3. Les valeurs de F données par le magnétomètre à protons, transmises toutes les 30 secondes.
4. Le température de la tête du capteur à vanne de flux, la température de l'électronique de ce capteur et l'heure, toutes les 40 minutes.
5. Une séquence spéciale de cinq lectures du magnétomètre à protons, séparées par des intervalles de 5 secondes, entre les échantillons normaux fournis par le magnétomètre à protons. Ces valeurs (+I, −I, F, +D et −D) constituent la séquence de mesure quasi-absolue. Cette séquence est déclenchée toutes les 24 heures ou à la réception d'une commande.

Spécifications

Nom de l'instrument:	Narod Triaxial Fluxgate
Type:	noyau annulaire à autopolarisation
Fournisseur:	Narod Geophysics Ltd.
Propriétaire/ exploitant:	US Geological Survey
Fiabilité:	MTBF non connue MTTR non connue
Protection:	contre la foudre: non contre l'humidité: oui contre le brouillage RF: non
Alimentation:	0,8 W de secour sans interruption: oui
Restrictions à l'exportation:	oui
Coût:	6 000 $ US
3 composantes:	oui
Construction du capteur:	orthogonalité: ±6′ stabilité: 1,2″/mois 0,28″/°C
Résolution:	0,01 nT
Plage dynamique:	±83 000 nT
Stabilité:	meilleure que 0,3 nT/mois
Bande passante:	0 à 0,5 Hz à −3 dB, 3 pôles
Bruit de fond:	0,004 nT rms dans la bande passante
Linéarité:	0,005 % de l'échelle
Base de temps:	1,0 s/mois (non basée sur le secteur)
Fréquence d'échantillonnage:	40 Hz *
Intervalle de mesure:	60 s **
Stockage:	10 semaines
Coefficient de température:	tête: 0,03 nT/°C console 0.04 nT/°C
Plage de température:	−20°C à +50°C
Enregistrement de la température:	résolution de 0,1°C
Capteurs d'angle vertical:	aucune spécification
Capteurs d'azimut:	aucune spécification
Commentaires:	polarisation par incréments de 338 nT, de −246 à +246 incréments, vitesse de modification de la polarisation: 5 incréments par seconde * doit être remplacée par une fréquence d'échantillonnage de 5 Hz ** doit être remplacé par un intervalle de 5 s

MAGNÉTOMÈTRE PHOTOÉLECTRIQUE À TORSION MPT, (INSTITUT DE GÉOPHYSIQUE, ACADÉMIE DES SCIENCES DE POLOGNE, INSTITUT MÉTÉOROLOGIQUE DE FINLANDE)

Wojciech Turewicz, Chris Sucksdorff et Lasse Hakkinen

Avantages du MPT par rapport aux magnétomètres classiques

Des variomètres utilisant des aimants suspendus à des fibres sont utilisés dans les observatoires magnétiques depuis plus de 100 ans. Dans de nombreux observatoires, on utilise encore des variomètres La Cour et tous les observateurs sont d'accord pour reconnaître leur fiabilité et leur facilité d'utilisation et d'entretien. Le plus grave inconvénient de ce type d'instrument est qu'il est impossible de les brancher directement à un enregistreur de données numériques.

Il est possible de remédier à cet inconvénient en adjoignant à un de ces variomètres classiques un électronique simple qui n'affecte aucun paramètre de l'instrument. Cette modification permet en outre d'améliorer plusieurs paramètres: résolution, linéarité, coefficients de température et largeur de bande. La stabilité à long terme n'est pas améliorée mais elle est conservée.

Le magnétomètre photoélectrique à torsion de type PSM est constitué par trois variomètres à torsion, des convertisseurs photoélectriques et un électronique simple. Cet instrument peut détecter toutes les variations de signaux électromagnétiques nécessaires pour les besoins courants d'un observatoire magnétique. Un seul instrument permet en effet d'enregistrer des micropulsations et les variations à long terme des trois composantes du champ magnétique: H, D et Z ou X, Y et Z.

L'électronique du PSM est comparativement simple, ce qui lui confère une grande fiabilité. L'utilisation d'un enregistreur moderne de données numériques permet d'éviter d'avoir à développer un papier photographique. L'ensemble des opérations à effectuer chaque jour pour assurer le fonctionnement d'un PSM est inférieur à celui nécessaire pour les magnétographes classiques.

Principe fondamental de fonctionnement

Le principe de base du photoconvertisseur est celui d'un variomètre à torsion constitué par un aimant suspendu à un fil qui suit les variations d'un champ magnétique. Un faisceau émis par une source lumineuse tombe sur le miroir du variomètre solidaire de l'aimant. Le faisceau réfléchi par le miroir éclaire un convertisseur à photodiodes constitué par deux photodiodes au silicium et un dispositif optique simple.

Le courant photoélectrique donné par les photodiodes est transformé en tension par un amplificateur à gain élevé qui donne le signal de sortie proprement dit celui du photoconvertisseur. Une partie du courant de sortie est envoyé dans une bobine de contre-réaction qui diminue considérablement l'angle de rotation des aimants suspendus du PSM par rapport à celui d'un variomètre classique. Cette importante contre-réaction permet également une compensation automatique des éventuelles instabilités des composants électroniques du capteur, augmentant encore la stabilité des paramètres dynamiques du PSM.

Spécifications

Nom de l'instrument:	magnétomètre photoélectrique à torsion
Type:	PSM
Fournisseur:	capteur et partie analogique: Institut de géophysique Pan, Pologne, partie enregistrement numérique des données: Institut météorologique de Finlande
Propriétaire/ exploitant:	Institut météorologique de Finlande
Fiabilité:	Sucksdorff/Turewicz
	MTBF — 2 ans
	MTTR — du montage électronique: 2 jours
	— des capteurs: 1 mois
Protection:	contre la foudre: oui
	contre l'humidité: non
	contre le brouillage RF: oui
Alimentation:	12 V
	capteurs et circuits analogiques: 2,5 W
	énregistrement numérique: 6 W
	de secours sans interruption: oui
Restrictions à l'exportation:	non
Coût:	capteurs et circuits analogiques 4 500 $ US
	énregistrement numérique 10 000 $ US
3 composantes:	oui
Construction du capteur:	orthogonalité: ±3,0′
	stabilité: 0,2″/mois
	0,2″/°C
Résolution:	0,01 nT
Plage dynamique:	±3 000 nT
Stabilité:	1 nT/mois
Bande passante:	de 0 à 5 Hz à −3 dB, 4 pôles
Bruit de fond:	0,01 nT rms dans la bande passante
Linéarité:	0,1 % de l'échelle
Base de temps:	1 s/mois (non basée sur le secteur)
Fréquence d'échantillonnage:	1 Hz
Intervalle de mesure:	2 s et plusieurs heures
Stockage:	1 semaines à raison de 2 échantillons/min
Coefficient de température:	tête: 0,2 nT/°C
	console: 0,2 nT/°C
Plage de température:	+10 à +50°C
Enregistrement de la température:	résolution de 0,01°C

Capteurs d'angle vertical:	non
Capteurs d'azimut:	non
Réponse en fréquence:	plate (à 0,1 %) de 0 à 5 Hz en option, de 0 à 0,2 Hz
Sorties d'enregistrement:	sortie c.c. pour enregistreur de tout type, sortie c.a. pour l'enregistrement des micropulsations sortie de signal de température toutes les sorties ont une plage de −10 à +10 V
Sensibilité sorties c.c.:	5 gammes, de 2 mV/nT à 200 mV/nT
Sensibilité sortie c.a.:	15 gammes, de 10 mV/nT à 4 V/nT
Commentaires:	1. L'instrument est constitué de trois unités: capteur, bloc analogique et bloc d'enregistrement numérique. 2. Le bloc analogique comprend deux filtres: a) basse fréq. b) haute fréq. (5 Hz) pour l'étude des pulsations.

MAGNÉTOMÈTRE À QUARTZ DIMARS (INSTITUT EOTVOS)

L. Hegymegi, L. Drimusz, Z. Koros

Introduction

Le DIMARS est un système pour les observatoires basé, sur un microprocesseur qui fournit un enregistrement numérique du champ magnétique terrestre (fig. 3.3 et 3.4). Le système contient l'électronique de mesure et de commande, les variomètres, un capteur de température, un unité horloge/calendrier et un lecteur de disque souple.

Variomètres magnétiques

Les variomètres à quartz à fibre de torsion comportent un dispositif de contre-réaction et un système de bobines d'étalonnage. Un faisceau de lumière UV réfléchi par le miroir et porté par l'aimant est converti en signal électrique par un capteur photoélectrique sensible aux UV. Quand le champ magnétique varie, un courant proportionnel au signal détecté est envoyé dans la bobine pour créer un champ compensateur qui s'oppose à la déviation de l'aimant. On mesure la tension proportionnelle à ce courant.

N'importe quel type de variomètre donnant un signal de sortie électrique peut être utilisé comme détecteur de signal, mais la justesse du système dépend surtout de ce dernier élément.

L'étalonnage du variomètre est effectué par le système lui-même. Il envoie trois courants différents dans les sens positif et négatif dans les bobines des variomètres et mesure le courant et la tension délivrés par le variomètre. Le magnétomètre à protons est branché au système par une série de liaison.

Figure 3.3 Le système DIMARS de l'institut Eotvos en Hongrie.

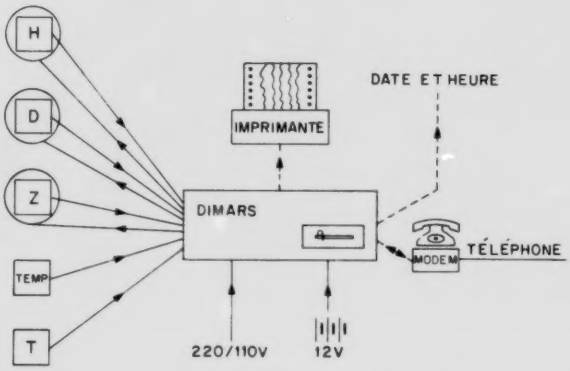


Figure 3.4 Diagramme du système DIMARS.

Électronique

Le convertisseur A/N mesure le signal de sortie du variomètre à intervalles de 2 s. Le système calcule la moyenne des valeurs mesurées toutes les 10 s et enregistre cette donnée, puis calcule la valeur moyenne toutes les minutes. Les valeurs moyennes pour chaque minute sont enregistrées et gardées en mémoire pour servir de base à d'autres calculs. Le système calcule ensuite la moyenne horaire à partir des moyennes de chaque minute. Les valeurs minimale et maximale pour chaque voie, y compris celles données par le magnétomètre à protons sont contrôlées et enregistrées chaque jour. Les valeurs moyennes sont calculées à la fin de chaque journée et de chaque mois. Dans les 24 heures qui suivent la fin du mois, toutes les valeurs moyennes de ce mois peuvent être enregistrées sans pertes de données. Le système peut démarrer et gérer automatiquement un enregistrement rapide. Cet enregistrement commence lorsque la variation de la composante H satisfait aux conditions suivantes:

$$H > A/10\,\text{min} \text{ ou } H > B/1\,\text{h}$$

où A et B sont des valeurs programmées par l'opérateur et H est la variation actuelle de la composante H. L'enregistrement rapide peut être interrompu par l'opérateur.

Enregistreurs

Le système comporte un lecteur de disque souple de 5,25 po incorporé. La disquette comporte deux fichiers. Le premier fichier contient l'en-tête avec les données d'identification de la station, la date et l'heure, les valeurs de la ligne de base, la température des capteurs et les données d'étalonnage. L'en-tête est suivie de la série de blocs d'enregistrement de 10 minutes. Le premier enregistrement de chacun de ces blocs comprend la date et l'heure et la température. Il est suivi de dix enregistrements de données contenant les valeurs moyennes pour chaque minute des trois composantes et du champ total. Le dernier fichier est facultatif; il contient les valeurs relevées pendant les 10 secondes d'un enregistrement rapide. Du fait de la capacité limitée de la disquette, le premier fichier est enregistré en données ASCII et le deuxième en binaire. Le système comporte une sortie parallèle Centronic polyvalente qui permet de brancher au DIMARS une imprimante par points ou un enregistreur sur bande magnétique. Toutes les données mesurées et enregistrées par l'équipement peuvent être transmises par l'intermédiaire de la sortie Centronic. En outre, l'imprimante peut être utilisée pour donner un magnétogramme de synthèse en temps réel.

Fonctionnement du système

Le DIMARS fonctionne directement sur le secteur ou sur une alimentation par batteries. Pour prévenir les coupures de secteur, il comporte des batteries incorporées qui maintiennent sous tension l'horloge et la mémoire. Pendant les pannes de courant, le système arrête les mesures mais conserve toutes les données relevées précédemment et qui ont été mises en mémoire. Les mesures et l'enregistrement reprennent lorsque la tension est rétablie.

Si l'appareil est sous le contrôle direct d'un opérateur, les données enregistrées peuvent être sauvegardées en changeant la disquette. Si les seules données enregistrées sont les valeurs moyennes pour chaque minute, la disquette peut contenir jusqu'à 8 jours de relevés. Si des enregistrements rapides ont été effectués en plus des relevés normaux, la disquette ne permet de stocker que les relevés de 4 jours.

Le DIMARS comporte une série d'entrées permettant de brancher un modem qui permet de télécommander par ligne téléphonique. En mode duplex, toute les commandes peuvent être actionnées à distance par l'opérateur et toutes les données relevées et enregistrées par le système peuvent être envoyées à un terminal. La transmission des données peut être répétée à un moment quelconque et les données peuvent être effacées de la disquette une fois leur transmission vérifiée.

Caractéristiques techniques principales:

— nombre de canaux d'entrée: 5 (H,D,Z,F,T), mesure différentielle, flottante
— résistance d'entrée: 1 mégohm
— amplitude du signal d'entrée: ±2 V
— bruit maximal en mode commun à l'entrée: 4 V
— signal d'entrée numérique: RS-232C (1 200 bauds, 7 bits, 2 bits d'arrêt, sans parité)
— sortie d'étalonnage: 3 sorties de courant programmables
— sortie du calendrier: RS-232C (1 200 bauds, 7 bits, 2 bits d'arrêt, sans parité)
— branchement du terminal de télécommande: RS-232C (duplex 300/1200 bauds, 7 bits, 2 bits d'arrêt, sans parité)
— sortie d'enregistreur numérique: 8 bits parallèle, type Centronics
— enregistreur autonome: disquette de 5,25 po (format MS-DOS IBM-PC/XT/AT, 360 Ko)
— alimentation: 110/220 V, 50/60 Hz ou 12 V c.c.; 40 W
— dimensions: 420 mm (l) × 124 mm (p) × 340 mm (h)
— capteurs:
  — variomètres à quartz type Bobrov – 3 composantes
  — plage dynamique: ±1 000 nT
  — linéarité: 0,5 %
  — coefficient de température: < 0,5 nT/°C
  — stabilité; < 1nT/mois
  Fabriqué par IZMIRAN (URSS)

MAGNÉTOMÈTRE À VANNE DE FLUX D ET I DE LA DIVISION DE GÉOPHYSIQUE DE L'INSTITUT ROYAL NÉERLANDAIS DE MÉTÉOROLOGIE

J.H. Rietman

Introduction

Le magnétomètre à vanne de flux a été développé par la division de géophysique de l'Institut royal néerlandais de météorologie (IRNM) pour la mesure absolue de la déclinaison D et de l'inclinaison I à l'observatoire géomagnétique de Witteveen et pour le relevé de la carte géomagnétique des Pays-Bas.

Description de l'instrument

Le magnétomètre comprend un capteur à vanne de flux fixé parallèlement à l'axe optique d'un théodolite non magnétique Zeiss 010A. Le capteur est un Fluxgate LFG-A13, fabriqué par Pandect Instrument Laboratory (anciennement Kelvin-Hughes). L'électronique a été construite par la division de géophysique de l'IRNM; son circuit est représenté à la figure 3.5. Le signal de sortie du capteur est affiché par un voltmètre numérique. Tous les composants de l'électronique (sauf le voltmètre numérique) ont été rassemblés dans une mallette de transport en aluminium.

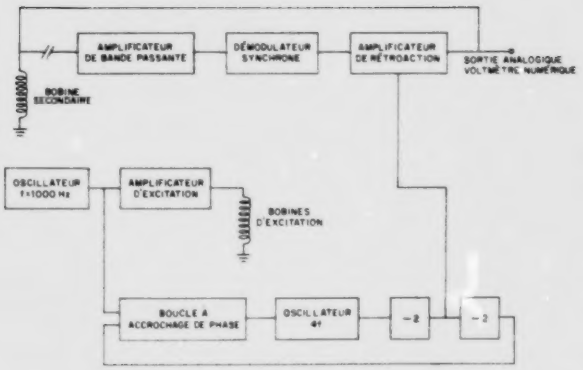


Figure 3.5 Diagramme du magnétomètre à vanne de flux de l'Institut météorologique royal de Netherlands.

Principe de fonctionnement

L'instrument est utilisé en détecteur de zéro. Lorsque le signal de sortie du capteur est nul, le champ magnétique est perpendiculaire au capteur. On commence par faire tourner le capteur dans le plan horizontal. Le signal donné par le capteur s'annule dans quatre positions (est et ouest magnétiques avec le capteur au-dessus et au-dessous de la lunette). La moyenne des lectures du cercle horizontal pour ces quatre positions donne un résultat indépendant de l'erreur due au manque de parallélisme entre le capteur et l'axe de la lunette et au décalage du capteur. Ce procédé donne la direction du nord magnétique. Pour calculer la déclinaison, on doit ensuite déterminer la direction du nord astronomique.

Lorsqu'on fait tourner le capteur dans le plan méridien, les quatre positions zéro sont perpendiculaires à la direction du champ total F, ce qui permet de calculer l'inclinaison.

L'intensité du champ magnétique total est mesurée à l'aide d'un magnétomètre à protons (PPM). Connaissant l'intensité du champ total, la déclinaison et l'inclinaison, on peut calculer l'intensité des composantes horizontales et verticales du champ magnétique terrestre.

Spécifications

Théodolite:	Zeiss Jena 010A (non magnétique)
Capteur à vanne de flux:	modèle LFG-A13 de Pandect Instrument Lab.
Montage électronique:	détecteur de zéro: résolution de 0,1 nT, ±200 nT pleine échelle
alimentation:	+/-18 V/60 mA et 9 V/5 mA
bande passante:	0 à 3 Hz
coefficient de température:	non mesuré
Justesse:	±5″ pour D et I

MAGNÉTOMÈTRE D ET I À VANNE DE FLUX DE L'INSTITUT MÉTÉOROLOGIQUE DU DANEMARK

E. Kring Lauridsen et O. Rasmussen

L'instrument de l'institut météorologique du Danemark est constitué par un magnétomètre à vanne de flux avec sortie numérique monté sur un théodolite non magnétique Zeiss Jena 010. Les détails pratiques et le principe de fonctionnement de cet instrument sont décrits dans un rapport de Kring Lauridsen intitulé « Experiences with the DI-fluxgate magnetometer inclusive theory of the instrument and comparison with other methods » (Expériences réalisées sur le magnétomètre D et I à vanne de flux, principe de fonctionnement de l'instrument et comparaison avec d'autres méthodes): Danish Meteorogical Institute, Geophysical Papers R-71, Copenhague, 1985.

MAGNÉTOMÈTRE À INDUCTEUR TERRESTRE DE SOKKISHA (OBSERVATOIRE MAGNÉTIQUE DE HUANCAYO, PÉROU)

Oscar Veliz

Description de l'instrument

Magnétomètre D et I à théodolite à inducteur terrestre Sokkisha GSI Premier ordre n° 40

Principe de fonctionnement

Une petite bobine cylindrique de détection tourne à 10 tours par seconde à l'aide d'une manivelle dans l'axe d'un théodolite non magnétique. Le signal alternatif produit s'annule lorsque l'axe de rotation est parfaitement parallèle à la direction du champ magnétique terrestre. La direction du champ géomagnétique se lit directement sur les cercles horizontal et vertical, et la déclinaison et l'inclinaison peuvent être déterminées avec une justesse de 0,1′.

Le signal de sortie de la bobine tournante est appliqué à l'entrée d'un amplificateur à gain élevé et de faible bruit dont le signal de sortie est appliqué à un indicateur à diodes électroluminescentes.

Composition

— Théodolite non magnétique et bobine tournante de détection
— Amplificateur
— Affichage à diodes électroluminescentes

Spécifications

Théodolite

Lunette:	longueur:	186 mm
	ouverture:	40 mm
	grossissement:	16
	image:	inversée
Cercle horizontal:	graduation:	20 minutes
	vernier:	2 minutes
	estimation:	0,2 minute
Cercle vertical:	graduation:	20 minutes
	vernier:	2 minutes
	estimation:	0,2 minute
Niveaux:	horizontal:	10″ /2 mm
	vertical:	10″ /2 mm

Détecteur

Type:	à bobine détectrice tournante, enroulement en fil de cuivre émaillé
Résistance c.c.:	45 kΩ
Diamètre:	20 mm

Amplificateur électronique

Type:	circuit intégré
Largeur de bande:	10 Hz ±2 Hz
Gain:	110 dB
Alimentation:	12 V c.c.
Température:	−20°C à +50°C

LES INSTRUMENTS GEM (GEM SYSTEMS INC., CANADA)

Ivan Hrvoic

Magnétomètre à protons (Overhauser) à mémoire GSM-10

Résolution:	0,1 nT
Précision absolue:	0,2 nT
Plage de mesure:	20 000 à 100 000 nT, avec accord automatique et prise en charge prioritaire manuelle
Tolérances sur le gradient:	jusqu'à 5 000 nT/m

Modes de fonctionnement

Manuel:	enregistrement automatique des paramètres suivants: label, date et heure, champ magnétique et codes d'erreur.
Station de base:	enregistrement automatique des paramètres suivants à intervalles allant de 3 s à 24 h: date et heure, champ magnétique et codes d'erreur.

Capacité de stockage

Mode manuel:	2 700 lectures en version standard, 5 350 et 8 060 en option.
Mode station de base:	7 300 lectures en version standard, 14 770 et 22 220 en option (18 h de fonctionnement à intervalles de 3 s).
Puissance consommée:	2 W pendant une lecture, 300 mW en attente
Alimentation:	accumulateur au plomb de 12 V, 2,2 A.h autres alimentations en option
Température de fonctionnement:	−40 à +60°C
Commentaires:	pas de transfert de données (une lecture à la fois) à un dispositif de stockage de masse; sera disponible plus tard.

Magnétomètre à protons (Overhauser) à mesure continue GSM-11

Résolution:	0,1 nT (jusqu'à 10 lectures par secondes)
Bruit de fond global:	0,01 nT à 1 lecture/s 0,02 nT à 2 lectures/s 0,05 nT à 5 lectures/s 0,1 nT à 10 lectures/s
Intervalles de lecture:	sélectables par incréments de 0,1 s, de 0,1 s à 9,9 s
Justesse:	0,5 nT; stabilité de la base de temps: 1 ppm de −35 à +55°C; dérive de 1 ppm par an
Ajustement:	système à large bande; aucun ajustement nécessaire
Plage de mesure:	20 000 à 100 000 nT
Température de fonctionnement:	−35 à +55°C
Alimentation:	22-32 V, puissance: moyenne 15 W, maximale 25 W
Signal continu:	la fréquence de précession des protons sans relaxation est obtenue par effet Overhauser. Ce dispositif permet une mesure continue du champ magnétique, en opposition au mécanisme par échantillonnage des magnétomètres à protons classiques
Sortie analogique:	3 voies — champ magnétique, mesure grossière — champ magnétique, mesure fine — quatrième différentielle (mesure du bruit) échelles analogiques entièrement programmables sur les trois voies, de 1 à 10 000 nT pleine échelle
Sortie numérique:	BCD à 7 chiffres, portes d'accès série RS-232C et parallèle IEEE-488 (GPIB)
Affichage:	matrices de points à crystaux liquides: 7 chiffres pour l'affichage du champ en nT, indication d'état, et niveau de bruit sur 4 chiffres (4e différentielle)
Commentaires:	magnétomètre à protons le plus perfectionné à l'heure actuelle

Magnétomètre à protons à mémoire GSM-18

Résolution:	0,1 nT
Justesse:	0,5 nT
Plage de mesure:	20 000 à 100 000 nT, avec ajustement automatique
Tolérances sur le gradient:	Jusqu'à 5 000 nT/m
Modes de fonctionnement	
Manuel:	enregistrement automatique des paramètres suivants: label, heure, champ magnétique et codes d'erreur
Station de base:	enregistrement automatique de l'heure et du champ magnétique à intervalles allant de 3 s à 60 min.
Capacité de stockage	
Mode manuel:	2 700 lectures en version standard, 5 350 et 8 060 en option.
Mode station de base:	7 300 lectures en version standard, 14 770 et 22 220 en option (18 h de fonctionnement à intervalles de 3 s).
Puissance consommée:	8 W pendant une lecture, 300 mW au repos et 30 mW en attente
Alimentation:	accumulateur NiCd de 12 V, 2 A.h autres alimentations en option
Température de fonctionnement:	−40 à +60°C
Commentaires:	pas de transfert de données à un dispositif de stockage de masse: sera disponible plus tard.

Magnétomètre à protons GSM-8

Résolution:	1 nT ou 0,5 nT en option
Justesse:	1 nT sur toute la plage de mesure
Plage de mesure:	20 000 à 100 000 nT (23 gammes avec chevauchement)
Tolérances sur le gradient:	jusqu'à 5 000 nT/m
Modes de fonctionnement:	manuel, avec bouton-poussoir: nouvelle lecture toutes les 1,85 s, affichage actif entre les lectures.
Cycle automatique:	démarrage par bouton-poussoir, une lecture toutes les 1,85 s
Cycle d'autotest:	commande par bouton-poussoir, période de 7 s.
Sortie:	affichage −5 chiffres à crystaux liquides de 1 cm de haut, visible quel que soit le niveau de lumière ambiante. Numérique — fréquence de précession (multipliée) et impulsion contrôlée. Analogique — 0 à 99 nT (en option)
Déclenchement externe:	Permet de déclencher le cyclage par un signal extérieur, avec des périodes plus longues que 1,85 s. Cycle plus rapide que 1 mesure/s en option.
Puissance:	8 W pendant la lecture, 10 à 18 V c.c.
Alimentation:	interne — accumulateurs NiCd 12 V, 0,75 Ah, 3 000 lectures à pleine charge. Externe — 12 à 18 V
Température de fonctionnement:	−40 à +55°C
Commentaires:	économique pour les mesures standard de champ total.

Magnétomètre à protons GSM-9 (Overhauser)

Résolution:	1 nT (0,5 nT en option)
Justesse:	1 nT sur toute la plage de mesure
Plage de mesure:	20 000 à 100 000 nT (23 gammes avec chevauchement)
Tolérances sur le gradient:	jusqu'à 5 000 nT/m
Modes de fonctionnement:	manuel, avec bouton-poussoir: nouvelle lecture toutes les 1,85 s, affichage entre les lectures. cycle automatique: démarrage par bouton-poussoir, une lecture toutes les 1,85 s (en option) cycle d'autotest: commande par bouton-poussoir, période de 7 s.
Sortie:	affichage: 5 chiffres à crystaux liquides de 1 cm de haut, visible quel que soit le niveau de lumière ambiante. numérique: fréquence de précession (multipliée) et impulsion contrôlée, résolution de 0,5 nT. analogique: 0 à 99 nT (en option)
Déclenchement externe:	permet de déclencher le cycle par un signal extérieur, avec des périodes plus longues que 1,85 s. Cycle plus rapide que 1 mesure/s en option.
Puissance:	1 W pendant la lecture, 10 à 18 V c.c.; courant de 3 mA en mode d'attente.
Alimentation:	interne: accumulateurs NiCd 12 V, 0,45 Ah, 15 000 lectures à pleine charge. Bloc jetable de batteries au lithium permettant plus de 250 000 lectures; ou 10 batteries alcalines type D permettant plus de 150 000 lectures. externe: 12 à 18 V
Température de fonctionnement:	−40 à +55°C
Commentaires:	faible consommation pour les mesures standard de champ total.

DOWTY ELECTRONICS LTD (DOMAINES MAGNÉTIQUES)

Ian Bell et Mike Hellard

Magnétomètres monoaxial (SAM 3) et triaxial (TAM 3)

Sonde(s) à vanne de flux

Les sondes individuels des magnétomètres SAM 3 et TAM 3 sont constituées d'un noyau ferromagnétique entouré d'un enroulement d'excitation toroïdal. Cet ensemble est logé dans un mandrin moulé sur lequel est enroulé la bobine de détection cylindrique. Une bobine supplémentaire est fixée sur la vanne de flux pour la compensation de champ et l'étalonnage. Cette bobine est indépendante de la bobine de détection, mais est montée sur le même axe. L'axe de détection de la sonde est défini par l'axe de la bobine de détection. La vanne de flux est protégée contre l'environnement et entièrement scellée.

Électronique du magnétomètre

Le magnétomètre utilise le principe de la vanne de flux à deuxième harmonique en boucle fermée. Les signaux proportionnels au champ produits par la vanne de flux sont du type à double bande latérale à modulation d'amplitude avec porteuse supprimée. Ces signaux représentent en fait un signal de déséquilibre de flux; ils sont envoyés par l'intermédiaire de l'enroulement de détection à un circuit de traitement qui assure leur transformation. Le circuit de traitement traduit le signal proportionnel au champ en bande de base. L'application d'un courant de réinitialisation ferme la boucle du circuit et ramène le champ de la vanne de flux à une valeur nominale zéro dans des conditions statiques. L'utilisation d'un gain important et d'une forte contre-réaction permet d'obtenir une bonne linéarité et des performances stables.

Spécifications

Dynamique:	maximum: 100 μT ±10 V c.c. Le signal de sortie correspond à la déviation pleine échelle de la gamme appropriée
Bruit (crête-à-crête) dans la bande de 0 à 10 Hz:	pas plus de 1 nT en standard; valeur typique: 0,3 à 0,5 nT
Fréquence de coupure supérieure:	1, 10, 100 ou 1 000 Hz, commutée
inférieure:	0 Hz (c.c.)
Dérive:	inférieure à 0,5 nT/°C
Coefficient de température de la fonction de transfert de la bobine:	−16,7 ppm/°C
Gammes de sortie, avec le commutateur de sortie en position ×1:	3, 10, 30, 100, 300, 1 000 nT
avec le commutateur de sortie en position ×100:	300, 1000, 3000, 10000, 30000, 100000 nT
Température de fonctionnement:	0°C à +50°C, en version standard −50°C à +70°C en option
Compensation de champ:	±100 nT
Alimentation:	240 V 50/60 Hz avec accumulateur interne NiCd; 110 V 60 Hz en option
Autonomie:	15 heures entre deux charges de l'accumulateur
Commentaires:	il existe des sondes donnant un facteur de multiplication ×5 et ×10 des gammes (déviation pleine échelle de 500 μT et de 1 mT)

Magnétomètre différentiel triaxial DMAG-3

Résumé des spécifications

Plage dynamique:	±100 T
Largeur de bande:	0 à 10 Hz
Gammes:	−10 à +10 nT −100 à +100 nT −1 000 à +1 000 nT commutation automatique de gamme
Bruit du système:	inférieur ou égal à 0,5 nT crête à crête
Résolution:	inférieure ou égale à 0,25 nT
Justesse:	±1 % de la valeur pleine échelle, avec une limite inférieure de ±0,5 nT
Orthogonalité:	±0,1° (mécanique: 0,25°)
Plage de température:	stockage: −10 à +45°C fonctionnement: +5 à +35°C

SCINTREX CORPORATION

John Buckle et George Tibenski

Pour cet atelier, trois capteurs Scintrex ont été reliés à un système d'acquisition de données avec sortie sur table traçante et enregistrement sur bande magnétique à 9 pistes.

1. Magnétomètre à pompage optique à vapeur de césium de 0,01 nT de sensibilité, avec cycle de 1/10 de seconde et enregistrement du champ scalaire total.
2. Magnétomètre à protons MP3, sensibilité 0,1 nT, avec une mémoire incorporée permettant d'effectuer un enregistrement pouvant atteindre 2 semaines à raison de une fois par minute.
3. Magnétomètre vectoriel à vanne de flux orientable dans les plans X, Y et Z, avec une résolution de 0,001 nT et sortie analogique branchée sur une convertisseur A/D.

VANNE DE FLUX D ET I DE L'INSTITUT DE PHYSIQUE DU GLOBE

D. Gilbert

Cet appareil est décrit en détail à la section 6

Principe de la mesure
— Le capteur à vanne de flux est utilisé comme détecteur de zéro pour la mesure de D et de I.
— Le capteur à vanne de flux est placé dans un champ compensé pour effectué la mesure des composantes H, X, Y ou Z.

Théodolite: Carl Zeiss Jena, modèle 010B (version non magnétique)
— erreur angulaire moyenne ± 1″ (cercles vertical et horizontal)
— sensibilité du niveau à bulle: 10″ pour un mouvement de 1 mm de la bulle
— justesse estimée de la mise au niveau: ± 1″ (erreur de stabilisation du pendule: ± 0,3″)
— poids: 4,8 kg.

Capteur à vanne de flux:
— longueur 80 mm, diamètre extérieur 18 mm (double noyau saturé)
— signal de sortie: 2 mV/nT
— plage dynamique: ± 350 nT
— bruit de fond: 0,2 nT crête à crête de 0 à 0,5 Hz
— coefficient de température: inférieur à 0,05 nT/°C dans un champ nul
— erreur du capteur: 2 nT

Électronique et affichage de mesure:
— indicateur de contrôl: résolution de l'affichage de 0,1 nT, linéarité 10^{-3}
— largeur de bande: 0 à 0,5 Hz
— linéarité du courant de compensation: 10^{-4}
— plage de mesure (méthode de compensation): $\pm 10^{4}$ nT
— coefficient de température: inférieur à 0,2 nT/°C pour un champ compensé de 50 000 nT.

Alimentation: batterie au plomb scellée (12 V, 4 Ah), consommation 100 mA sous 12 V
Température de fonctionnement: − 10 à + 45°C
Poids: 7 kg

VARIOMÈTRE TRIAXIAL À VANNE DE FLUX — INSTITUT DE PHYSIQUE DU GLOBE/THOMSON-SINTRA

D. Gilbert et J.-J. Periou

La conception, la réalisation et le fonctionnement de cet instrument sont décrits en détail à la section 7.

Spécifications

Nom de l'instrument:	variomètre triaxial à vannes de flux
Type:	VFO 31
Fournisseur:	Thomson-Sintra, Brest, France
Propriétaire/ exploitant:	Institut de physique du Globe de Strasbourg
Fiabilité:	MTBF — 10 ans MTTR — 1 jour
Protection:	contre la foudre: non contre l'humidité: capteur non, électronique oui contre le brouillage RF: non
Alimentation:	capteur: 4 W capteurs + enregistreur: 12 VA sous 220V de secours sans interruption: oui limite de 12 h, accumulateur 12V, 4 Ah
Restrictions à l'exportation:	non
Coût:	23 000 $ US en 1984
3 composantes:	oui
Construction du capteur:	différence entre l'axe géométrique et l'axe magnétique de la bobine: < 5′ axes orthogonaux à ± 10′ stabilité: < 2″ d'arc/mois < 1″ d'arc/°C
Résolution:	0,1 nT
Plage dynamique:	± 1 000 nT ± 2 000 nT (en option)
Stabilité:	< 1nT/mois
Bande passante:	de 0 à 0,5 Hz à − 3 dB, 1 pôle
Bruit de fond:	0,1 nT (valeur quadratique moyenne) dans la bande passante 0,1 nT crête à crête entre 0,001 Hz et 0,5 Hz
Linéarité:	0,1 % de l'échelle
Base de temps:	1,0 s/mois (non basée sur le secteur)
Fréquence d'échantillonnage:	5 Hz
Intervalle de mesure:	60 s
Stockage:	> 8 semaines
Coefficient de température:	tête: < 0,15 nT/°C Console: < 0,2 nT/°C avec compensation de 50 000 nT
Plage de température:	0°C à + 40°C
Enregistrement de la température:	voir commentaire
Capteurs d'angle vertical:	voir commentaire
Capteurs d'azimut:	voir commentaire
Erreur due au capteur:	< 10nT
Compensation de la composante permanente:	± 79 900 nT
Dimensions du capteur:	longueur 100 mm, diamètre 20 mm
Sensibilité du capteur:	0,15 μA/nT

Courant d'excitation:	120 mA crête à crête
Niveau de la deuxième harmonique du signal détecté:	3,5 μV eff./nT
Courant de décalage du générateur de courant:	< 1nT
Sensibilité du signal de sortie:	5 mV/nT

Commentaires:

L'observatoire national de Chambon la Forêt a exploité 1 variomètre depuis 1979.

Les observatoires des Terres Australes et Antarctiques françaises ont exploité 4 variomètres depuis 1972.

Il y a eu deux pannes, dues à la foudre.

Les variomètres sont installés soit dans des abris thermostatés soit dans des bâtiments isolés (caves). À Chambon la Forêt, le niveau n'a été vérifié que 5 ans après l'installation,lors du réalignement par rapport au méridien magnétique. Après avoir mis le variomètre au niveau et installé sur le méridien, les valeurs de ligne de base de D et de H étaient évidemment modifiées mais celle de Z est restée la même qu'avant l'alignement.

Caractéristiques du système d'acquisition de données numériques

Entrées analogiques pour les signaux provenant du magnétomètre à vanne de flux:
— nombre de canaux analogiques: 8
— niveau d'entrée nominal: ±5 V
— impédance d'entrée: 1 000 M Ω
— convertisseur analogique/numérique: intégrateur à double pente avec correction automatique de zéro
— rejet des signaux 50 Hz
en mode série: supérieur à 50 dB
— durée du cycle d'intégration de la tension à mesurer: 40 ms
— durée d'un cycle de mesure: 70 ms
— plage dynamique: ±10 000 points
— précision: $\pm 10^{-4}$ ±1 unité
Entrée numérique pour les signaux provenant du magnétomètre à protons
— oscillateur: 5 MHz compensé en température
— stabilité: 10^{-7}/jour, 5×10^{7} entre 0 et +50 °C
— échantillonnage: toutes les 2, 10, 20 s et 1, 2, 10, 20 min
Codage du signal de sortie: BCD
Système
— enregistreur sur bande magnétique à 7 ou 9 pistes
— enregistreur sur cassette
— imprimante
Contrôle: affichage, toutes les heures ou tous les jours, des signaux donnés pour chaque composante par les magnétomètres à protons et à vanne de flux.

THÉODOLITE POUR MESURES DE MAGNÉTISME CJ6 ET MAGNÉTOMÈTRE TROIS COMPOSANTES À VANNE DE FLUX CTM-302 (INSTITUT DE GÉOPHYSIQUE, ACADEMIA SINICA, CHINE)

Liu Chang-Fa

(REMARQUE: ces instruments n'avaient pas été apportés à l'atelier mais seulement décrits par les participants.)

Introduction

L'Institut de géophysique de l'Academia Sinica a été fondé à 1950. Depuis, notre institut a conçu et produit des instruments géomagnétiques de haute qualité destinés aux observatoires magnétiques et aux relevés des champs magnétiques, tels que les variomètres 57 et CB3, le théodolite pour mesures magnétiques CJ6 et le magnétomètre trois composantes à vanne de flux CTM-302. Actuellement, ces instruments sont utilisés dans des observatoires magnétiques et dans des stations de mesures de variations. Au cours des dernières années, nous avons mis sur pied un nouveau système d'observatoire magnétique automatique.

Théodolite pour mesures magnétiques CJ6

Cet instrument peut mesurer de manière précise la déclinaison D et l'intensité horizontale H du champ géomagnétique, ce qui fournit un moyen rapide de calculer l'amplitude et la direction du champ magnétique lorsque cet instrument est utilisé avec un magnétomètre à protons. L'instrument comprend un déclinomètre et un magnétomètre à quartz mesurant l'intensité du champ magnétique dans le plan horizontal. Ces deux appareils utilisent le même cercle optique horizontal dont le mode de lecture est analogue à celui des théodolites optiques standard, lequel permet des lectures d'angle aisées. Le théodolite, (conçu par Du Ling et Wang Xiu-Shan) est fabriqué de cuivre, d'alliage cuivre-aluminium et d'autres matériaux à magnétisme très faible. Il est facile de transporter et de le faire fonctionner dans un observatoire ou en plein air.

Spécifications

Quantités mesurées:	déclinaison D et intensité du champ magnétique H dans le plan horizontal
Justesse:	D ±0,2′ (erreur quadratique moyenne) H ±1,5 nT (erreur quadratique moyenne)
Plage de température:	−15 à +40°C
Alimentation:	9 V c.c.
Lunette:	grossissement 8, ouverture de l'objectif 20 mm, angle de champ 3°
Sensibilités des niveaux de la plaque:	niveau tubulaire 30″/2 mm niveau sphérique 8′/2mm
Poids et dimensions:	poids net 6,5 kg, 256 × 141 × 428 mm

Le théodolite pour mesures magnétiques CJ6 est utilisé dans des observatoires magnétiques et dans des stations répétitrices en Chine. Il a également été utilisé pour des observations absolues à l'observatoire magnétique de Port Moresby, en Papouasie Nouvelle Guinée, lors de l'éclipse totale de soleil, le 11 juin 1983. Le CJ6 est de fonctionnement stable et facile à utiliser et coûte, en Chine, l'équivalent de 3 000 $ US.

Magnétomètre trois composantes à vanne de flux CTM-03

Le magnétomètre CTM-03 permet l'enregistrement précis des variations des trois composantes X, Y et Z du champ géomagnétique. Cet instrument comprend un tableau électronique compact, 30 m de câble et un capteur à vanne de flux. Les signaux de sortie provenant des trois composantes varient de +10 à ×10 V. L'instrument peut être utilisé pour l'enregistrement analogique multivoie ou l'enregistrement sur cassette de variations lentes ou rapides. Le capteur à vanne de flux comporte un dispositif de compensation de température. Le magnétomètre (conçu par Liu Shi-Jie) est très stable et facile à utiliser.

Spécifications

Quantités mesurées:	variations relatives des composantes X, Y et Z du champ géomagnétique pour enregistrement analogique ou sur cassette à bande magnétique
Plage de mesure:	X et Y, de 0 à 50 000 nT Z, de 0 à 70 000 nT
Résolution:	0,1 nT
Sensibilité:	10 mV/nT
Plage dynamique:	±800 nT (8 V) par rapport à la ligne de base
Bruit de fond:	inférieur à 1 nT/°C
Réponse en fréquence:	0 à 2,5 Hz (−3 dB)
Coefficient de température:	inférieur à 1 nT/°C
Plage de température:	0°C à +35°C
Moniteur:	0 à ±500 nT (pleine échelle)
Filtre:	passe-bas de 0 à 2,5 Hz bande passante de 600 s à 400 ms
Alimentation:	220 V 50 Hz ou ±18 V c.c., 3,5 W
Poids et dimensions:	net 20 kg, 220 × 350 × 220 mm (capteur) 520 × 410 × 180 mm (console)

Les magnétomètres à vanne de flux CTM-302 seront incorporés au nouveau système d'instruments de l'Observatoire magnétique automatique. On s'attend à ce que ce système améliore la qualité des observations géomagnétiques en Chine.

4. INSTRUMENTS ABSOLUS

COMPARAISONS DES INSTRUMENTS DE MESURES ABSOLUES ET OBSERVATIONS FAITES PENDANT L'ATELIER

L.R. Newitt, D. Gilbert, E. Kring Lauridsen, J. Rietman et O. Veliz

Introduction

Au cours de l'atelier sur les observatoires magnétiques et d'instrumentation il a été montré qu'il est maintenant possible de construire des magnétomètres à faible coefficient de température avec une bonne stabilité à long terme (voir par exemple la description du magnétomètre Thomson-Sintra, le magnétomètre de Narod et le magnétomètre photo-électrique à torsion, polonais). L'installation de ces magnétomètres dans l'observatoire devait essentiellement servir aux calculs de valeurs de bases des mesures absolues faites à n'importe quel moment grâce à la dérive réduite de ces magnétomètres entre les observations absolues. Bien que les magnétomètres soient stables il ne faut pas oublier que les piliers sur lesquels ils sont posés sont sujets à des changements d'inclinaison ou d'orientation. Les mouvements des piliers dépendent des matériaux utilisés, du type de sol ou des roches environnantes du type de construction et bien entendu des conditions climatiques. La discussion de quelques uns de ces facteurs en a été faite par Jansen van Beek et Loomer (1982) lors de la mise en oeuvre de ces piliers dans nos observatoires des régions artiques. Ils donnent des exemples ou les observations montrent des dérives pouvant atteindre 100 nT pour une période de quelques mois, dérives qu'il faut attribuer aux seuls mouvements des piliers. Nos collègues français nous signalent avoir rencontré les mêmes problèmes dans leurs observatoires de l'antarctique.

Ces constatations montrent que, quelque soit le type de magnétometre utilisé il est indispensable d'effectuer de fréquentes observations absolues. Par évidence la nouvelle génération de magnétomètres plus sensibles montrera mieux encore les défauts éventuels et nécessitera d'autant plus de précaution dans la détermination des valeurs de base. Avec les nouveaux instruments on atteint maintenant facilement 0,1 nT avec des images de bruits assez petites pour justifier cette précision, mais il est improbable que beaucoup d'observatoires dans le monde atteignent cette précision pendant les observations absolues. D'ailleurs les délégués de l'atelier n'étaient pas unanimes pour affirmer qu'une telle précision soit réellement indispensable et il n'ont pas trouvé d'accord sur l'obligation d'une telle exigence dans la routine habituelle.

Description des instruments

Étant donnée l'amélioration constante des observations il n'est pas surprenant que les délégués de l'atelier aient manifesté un grand intérêt pour les nouveaux instruments de mesures absolues. Un total de 16 instruments ont été soit montrés soit utilisés. De ceux-ci 7 étaient des magnétomètres à protons et ne seront pas discutés dans ce rapport. Les 9 autres appareils sont énumérés ci-après.

D&I Fluxgate Magnétometer (Danish Meteorological Institute, DMI)
D&I Fluxgate Magnétometer (Royal Netherlands Meteorological Institute, RNMI)
D&I Fluxgate Magnétometer (Commission géologique du Canada, CGC)
D&I Fluxgate Magnétometer (Institut de Physique du Globe, IPG)
Sokkisha Induction Magnétometer (Geophysical Institute of Perou, GIP)
D&I Fluxgate Magnétometer (Littlemore Scientific)
Quartz Déclinometer (Danish Meteorological Institute)
Quartz Horizontal Magnétometer (Danish Meteorological Institute)
D&I Fluxgate Magnétometer (EDA Instruments Inc)

Lès 4 derniers instruments ont seulement été montrés, les 5 premiers ont été utilisés pour des séries d'observations comparatives.

Les descriptions des instruments ont été données par les délégués responsables dans des sessions précédentes cependant nous ferons ici quelques commentaires supplémentaires sur les 4 magnétomètres D&I utilisés pour ces comparaisons.

Ces instruments sont tous constitués d'un théodolite amagnétique sur la lunette duquel est fixée une sonde fluxgate. Le DMI, le RNMI, l'IPG utilisent des théodolites Zeiss-Jena 010A ou 010B. Le CGC utilise un théodolite Zeiss-Jena 020A. Tous ces modèles sont des théodolites à lecture directe, les premiers ont des échelles graduées en secondes d'arc ou 2/10 ème de milligrades; tandis que le 020A à une échelle graduée en minute avec une estimation de précision de lecture de 0,1 minute. La nivelle du 010B est graduée à 20 sec. d'arc par division celle du 020A à 30 sec. L'amplification de la lunette (télescope) est de 30 pour le 010B et de 25 pour le 020A. De tout ceci il résulte que le nivellement, les visées, les lectures, sont plus précises avec le 010B.

Les deux modèles présentent une stabilisation automatique du cercle vertical c'est-à-dire que la lecture du cercle vertical est donnée par rapport à un petit pendule et non par rapport à l'alidade. En théorie ceci implique qu'un nivellement rigoureux n'est pas nécessaire, cependant de nombreux tests ont été faits à l'IPG de Paris et paraissent montrer une plus grande dispersion des observations quand l'instrument n'est pas nivellé avec précision.

Tous les théodolites sont montés avec des sondes à vanne de flux. La plupart d'entre elles sont fabriquées par l'industrie spécialisée. Les électroniques associées et les composants qui constituent les ensembles ont été fabriqués et assemblés dans les laboratoires des instituts responsables. Des détails plus complets ont été donnés par ailleurs sur ces montages et réalisations. Deux sociétés au moins fabriquent des unités complètes qui sont également décrites, par ailleurs, il n'est donc pas nécessaire, pour des utilisateurs potentiels de développer et fabriquer eux mêmes leurs propres systèmes.

Par contre les utilisateurs potentiels devront faire attention à l'amagnétisme des théodolites qu'il ne faut pas supposer rigoureux à priori. Quelques participants nous ont

fait part de défauts constatés; il s'agissait de ressorts, de pinces de blocage, d'axes, de clips, de pieds de l'embase etc. S'il s'agit d'une partie aimantée dans l'embase il est absoluement indispensable de s'en affranchir; pour une partie aimantée dans le corps du théodolite ou de la lunette les défauts peuvent s'éliminer, théoriquement, par les 4 retournements nécessaires à la mesure mais il faut toujours tenir compte du fait que l'aimantation incriminée peut changer de forme et de grandeur pendant la mesure et ne pas se trouver être éliminée par les retournements. Chaque appareil doit être contrôlé attentivement et les parties suspectes remplacées par le spécialiste Zeiss local.

Il est remarquable de constater que 6 des 9 appareils de mesure cités ci-dessus soient des DI flux. Le DI flux avait été utilisé comme magnétomètre de terrain depuis 1947(Serson et Hannaford, 1956) et a été utilisé comme magnétomètre absolu dans les observatoires canadiens depuis 1948. Cependant il apparait que ce système n'ait pas été accepté comme instrument d'observatoire avant 1970 puisqu'il n'a pas été mentionné dans les textes de Wienert (1970) sur les observatoires magnétiques et les mesures de terrain. Dans les dernières années son utilisation s'est développée et les comparaisons récentes, par rapport aux standards classiques indiquent qu'une précision égale, sinon meilleure pêut être obtenue, ainsi qu'une répétitivité exemplaire. Par exemple, nos collègues de l'IPG ont comparé pendant cinq années avec les mesures classiques effectuées alors avec un inclinomètre de Cambridge et pendant deux années avec les valeurs obtenues à partir d'un système à bobines et magnétomètre à protons (Littlemore Scientific) réputé absolu (mesures et calculs méthode dite de Serson) Bien évidemment, les mesures n'ont pas été faites sur le même pilier mais ceux-ci présentent un delta F de l'ordre de 1 nT.

La comparaison des résultats des divers instruments utilisés en un même lieu par des observateurs différents offrait donc une bonne opportunité tant pour une comparaison des étalons que pour une démonstration des diverses techniques d'observatoires.

Procédure d'observation

Le DI Flux est essentiellement utilisé comme détecteur de zéro, c'est un appareil absolu. Dans le plan horizontal la sonde propose une valeur nulle lorqu'elle se trouve être perpendiculaire au méridien magnétique. Il y a 4 positions possibles de la sonde pour lesquelles la condition énnoncée est respectée. Il faut observer alternativement les quatres positions possibles que peut occuper la sonde dans le plan horizontal. Ces retournements permettent d'éliminer les erreurs dues aux mauvais alignements de la sonde, défauts de site et d'azimut ainsi que l'offset résultant de l'aimantation rémanente de la sonde et de l'électronique. La moyenne des 4 lectures du cercle horizontal du théodolite et les visées d'un repère terrestre d'azimut connu avant et après les 4 retournements donnent par un calcul simple appliqué aux différentes lectures l'angle de déclinaison. Connaissant la direction moyenne de l'axe perpendiculaire au méridien magnétique dans le plan horizontal déterminé ci-dessus, il est facile de venir selon l'axe du méridien (90 degrés) d'incliner la sonde jusqu'à trouver à nouveau une position où le champ est nul. On obtiendra ce zéro quand la position de la sonde sera perpendiculaire au vecteur champ. Il suffit de procèder aux quatres retournements classiques en lisant, cette fois, les positions sur le cercle vertical. Toutefois, il peut être démontré que seulement deux positions sont nécessaires pour éliminer les erreurs dûes au désalignement des bobines (Kring Lauridsen 1985). La moyenne de ces lectures donnera la valeur de l'inclinaison du champ magnétique.

Ces étapes sont fondamentales, mais les techniques d'observations actuelles et les méthodes employées pour les calculs des lignes de base varient d'un observateur à l'autre. Nous devons décrire brièvement ces méthodes.

Les observateurs de l'IPG et du RNMI utilisent des techniques similaires. Les positions des zéros sont recherchées au moment de l'échantillonnage du variomètre triaxial et du magnétomètre à protons de l'observatoire (en général une observation chaque minute). Dans l'intérieur d'une minute les lignes de base de D sont considérées constantes; il suffit d'appliquer la formule:

$$D_{bl} = D_{abs} - \sin^{-1}(\delta D / H_{abs})$$

where $D_{abs} = \frac{1}{4}(D_{t1} + D_{t2} + D_{t3} + D_{t4})$ and

$$\delta D = \frac{1}{4}(\delta D_{t1} + \delta D_{t2} + \delta D_{t3} + \delta D_{t4})$$

Les mesures d'inclinaison sont faites et calculées selon les mêmes principes. Les observateurs du DMI utilisent une technique légèrement plus compliquée. Au lieu de tourner la sonde jusqu'a obtenir un zéro exact, ils amènent le cercle horizontal à une valeur proche de la position nulle, ensuite à intervalles de minutes rondes, ils notent la valeur de la déflection. Trois valeurs sont enregistrées avant que le capteur ne soit amené à la position suivante. Une valeur de base est calculée pour chaque position de la sonde comme suit:

$$D_{bl}(1) = D_{abs}(1) + \sin^{-1}(S(1)/H_{abs}) - \delta D(1) s_D$$

où S est la valeur moyenne lue (après correction de signe) et S_D est la sensibilité du magnétomètre (si la valeur de sortie du magnétomètre est en nanotesla, on peut utiliser avec une meilleure précision $\sin^{-1}(\delta D / H_{abs})$à la place de $\delta D^* S_D$). La ligne de base finale est la moyenne des 4 lignes de base individuelles:

$$D_{bl} = \frac{1}{4}(D_{bl}(1) + D_{bl}(2) + D_{bl}(3) + D_{bl}(4))$$

L'observateur du CGC ne met pas l'instrument à zéro en même temps que l'échantillonnage du variomètre. Les 4 retournements sont effectués aussi vite que possible l'heure moyenne des observations est notée. En calculant la ligne de base avec trois valeurs relevées sur le variomètre approximativement centrées autour du temps moyen de mesure; on prend, la moyenne:

$$D_{bl} = D_{abs} - \sin^{-1}(\delta D / H_{abs})$$

where $D_{abs} = \frac{1}{4}(D_1 + D_2 + D_3 + D_4)$

and $\delta D = \frac{1}{3}(\delta D_{t-1} + \delta D_t + \delta D_{t+1})$

Cette méthode est intrinséquement moins précise que les deux autres et l'utilisation d'un théodolite 020A au lieu d'un 010B diminue encore la précision finale. Ces difficultés sont compensées en partie en effectuant 6 séries d'observations, c'est-à-dire au moins deux fois plus que celles des autres observateurs.

Le principe du magnétomètre Sokkisha est, comme il a déja été écrit, différent de celui du fluxgate. Quatre séries de lectures séparées sont nécessaires pour une observation complète de D ou de I. L'observateur du PGI note l'heure de début et l'heure de fin d'une série d'observation . La valeur moyenne des valeurs échantillonnées par le variomètre durant l'intervalle de temps de la mesure est utilisée pour le calcul de la valeur de base.

$$D_{bl} = D_{abs} - \sin^{-1}(\delta D / H_{abs})$$

where $D_{abs} = \frac{1}{4}(D_1 + D_2 + D_3 + D_4)$

and $$\delta D = 1/(T_2 - T_1 + 1) \sum_{k=T_1}^{T_2} \delta D_k$$

Programme des observations

Au début de l'atelier un programme avait été établi pour que chaque observateur puisse effectuer deux séries d'observations par jour aux piliers de référence de l'observatoire d'Ottawa (une série sur le pilier A une sur le pilier E). Ceci aurait apporté environ 12 observations par instrument ce qui aurait permis une bonne comparaison. Il devint rapidement apparent que ce programme ne pouvait être maintenu à cause des nombreuses autres activités de l'atelier qui demandaient beaucoup de temps à tous les membres participants. Quelques problèmes d'instrumentation ont également réduit le nombre des observations. Des ajustements des embases de certains théodolites ont été faits pour pouvoir les utiliser sur le pilier E. À cause de sa lunette excentrée le théodolite Sokkisha ne pouvait pas être utilisé sur le pilier A d'où il ne pouvait pas viser le repère d'azimut. Un facteur critique a affecté ces observations, il est du à la contamination provenant du bâtiment de l'observatoire par des instruments, sans oublier de mentionner le flot constant de visiteurs désireux d'observer et de discuter les méthodes de mesures.

Un autre problème apparaît dans le choix d'un variomètre pour le calcul des lignes de base qui devaient être comparées. Les données n'étaient disponibles, sur une base journalière que pour trois variomètres: le triaxial fluxgate Thomson-Sintra, l'ELSEC PPM vectoriel et le triaxial fluxgate AMOS. Le magnétomètre Thomson-Sintra est un instrument intrinsèquement très stable, malheureusement il a été monté sur un pilier à l'extérieur, donc affecté de façon plus importante que la normale par les effets de température et les mouvements du pilier. L'ELSEC 8200 PPM vectoriel a été installé sur un pilier intérieur mais il n'y avait pas de contrôle de température dans l'édifice. De plus, aucun instrument n'a pu être utilisé de façon continu pour diverses raisons: coupures de secteur, orages atmosphériques violents et surtout visites nombreuses des déléguées interessées. À l'observatoire d'Ottawa l'AMOS fonctionnait continuellement mais il a montré des dérives rapides inhabituelles durant l'atelier.

Pour toutes ces raisons, les résultats tabulés dans la section suivante ne comprennent pas de comparaison propre d'instrument, comparable à ceux faits périodiquement par les pays nordiques. Ils doivent plutôt être vus comme un « scénario du pire des cas »; c'est à dire une évaluation de degré de qualité des observations effectuées dans de mauvaises conditions.

Résultats

Les lignes de base calculées pour chaque instrument par chaque observateur en utilisant sa méthode normale de réduction, sont données dans les tableaux de 4.1 à 4.6 et sont dessinées sur les figures de 4.1 à 4.3. Les résultats sont présentés pour chacun des trois variomètres mentionnés précédemment, puisque chacun présentait des avantages différents. Le système Thomson-Sintra était installé pour enregistrer D,H et Z, composantes que l'on enregistre dans la plupart des observatoires à travers le monde. Une description de cet instrument a été donné par les délégués responsables dans des réunions précédentes. Le PPM vectoriel enregistre les composantes D, I et F soit les mêmes que celles mesurées avec le magnétomètre DI fluxgate et le magnétomètre Sokkisha. Le variomètre AMOS enregistre X, Y et Z en nanotesla permettant ainsi la comparaison des erreures pour les différentes composantes.

L'observateur 1 est du CGC. L'observateur 2 est de IPG. L'observateur 3 est du RMNI. L'observateur 4 est du DMI. L'observateur 5 est du CGC. Il utilise le même appareil que 1. L'observateur 6 est du PGI.

Table 4.1 Lignes de base D H et Z Thomson — Pilier A

			D_{bl} (345° +)		
Date	Obs1	Obs2	Obs3	Obs4	Obs5
1 août	40.61				—
2 août					40.71
3 août					—
4 août	39.47	39.45	39.39	39.70	—
5 août	38.98	39.45		39.00	38.78
6 août		39.35	39.30		
7 août				39.33	39.21
				39.13	
8 août			39.33	39.03	38.65
			H_{bl} (16800 nT +)		
Date	Obs1	Obs2	Obs3	Obs4	Obs5
1 août	34.7				—
2 août					38.0
3 août					—
4 août	41.2	40.7	39.1	38.8	—
5 août	38.7	41.7		38.4	38.9
6 août		41.5	40.0		
7 août				40.8	41.7
				41.2	
8 août			40.3		42.6
			Z_{bl} (54900 nT +)		
Date	Obs1	Obs2	Obs3	Obs4	Obs5
1 août	29.2				—
2 août					30.3
3 août					—
4 août	28.8	28.7	29.0	28.0	—
5 août	29.0	28.6		28.5	29.5
6 août		27.2	27.8		
7 août				29.3	29.6
				29.1	
8 août			28.5		29.1

Table 4.2 Lignes de base D H et Z Thomson —Pilier E

D_{b1} (345° +)				
Date	Obs2	Obs3	Obs4	Obs6
4 août	39.25	—	39.32	39.15
5 août	39.10	39.22	38.93	39.09
6 août				
7 août				39.29
				38.97
H_{b1} (16800 nT +)				
Date	Obs2	Obs3	Obs4	Obs6
4 août	43.0	—	42.0	41.5
5 août	43.4	40.7		44.6
6 août				
7 août				42.5
				45.2
Z_{b1} (54900 nT +)				
Date	Obs2	Obs3	Obs4	Obs6
4 août	30.3	—	30.7	30.3
5 août	30.4	29.7		29.8
6 août				
7 août				31.2
				29.1

Table 4.3 Lignes de base D et I ELSEC — Pilier A

D_{b1} (345° +)					
Date	Obs1	Obs2	Obs3	Obs4	Obs5
1 août	—				—
2 août					—
3 août					—
4 août	35.51	35.50	35.48	35.63	35.62
5 août	35.43	35.81		35.40	35.16
6 août		—	—		
7 août				—	—
				35.54	
8 août			36.32		35.51
I_{b1} (72° +)					
Date	Obs1	Obs2	Obs3	Obs4	Obs5
1 août	—				—
2 août					—
3 août					—
4 août	51.92	51.87	51.99	51.91	51.85
5 août	51.99	51.69		51.98	51.92
6 août		—	—		
7 août				—	—
				51.78	
8 août			51.85		51.72
δF (nT)					
Date	Obs1	Obs2	Obs3	Obs4	Obs5
1 août	—				—
2 août					—
3 août					—
4 août	−8.6	−8.2	−8.3	−8.6	−8.3
5 août	−8.6	−8.3	−8.4	−8.7	−8.2
6 août		—	—		
7 août				—	—
				−8.4	
8 août			−9.3		−8.0

Table 4.4 Lignes de base D et I ELSEC — Pilier E

D_{b1} (345° +)				
Date	Obs2	Obs3	Obs4	Obs6
4 août	35.31	35.37	35.39	35.38
5 août	35.41	35.37		35.37
6 août				
7 août				—
				35.45
I_{b1} (72° +)				
Date	Obs2	Obs3	Obs4	Obs6
4 août	51.76	51.85	51.86	51.76
5 août	51.64	51.78		51.55
6 août				
7 août				—
				51.56
δF (nT)				
Date	Obs2	Obs3	Obs4	Obs6
4 août	−6.4	−6.3	−6.0	−6.2
4 août	−6.0	−6.2		−5.8
6 août				
7 août				—
				−7.1

Table 4.5 Lignes de base X Y et Z AMOS — Pilier A

X_{b1} (nT)					
Date	Obs1	Obs2	Obs3	Obs4	Obs5
1 août	123.2				121.9
2 août					122.6
3 août					122.6
4 août	123.4	124.0	121.6	123.6	123.9
5 août	122.0	125.2		121.5	121.9
6 août		126.7	124.7		
7 août				125.7	125.9
				127.6	
8 août			126.6		126.7
Y_{b1} (nT)					
Date	Obs1	Obs2	Obs3	Obs4	Obs5
1 août	72.2				67.9
2 août					71.3
3 août					71.1
4 août	72.7	74.0	74.0	74.9	70.1
5 août	72.2	74.7		72.9	69.4
6 août		75.9	75.7		
7 août				75.2	72.6
				76.6	
8 août			75.5		70.5
Z_{b1} (nT)					
Date	Obs1	Obs2	Obs3	Obs4	Obs5
1 août	−87.3				−88.2
2 août					−87.8
3 août					−88.6
4 août	−88.0	−87.7	−88.0	−86.6	−87.9
5 août	−87.6	−88.2		−86.5	−88.0
6 août		−84.8	−85.8		
7 août				−85.3	−86.4
				−86.3	
8 août			−90.7		−89.7

Une droite de moindres carrées a été ajustée à chaque série de ligne de base listée dans les tables pour l'intervalle de temps 0100 TU du 4 août à 2400 TU du 8 août 1986. Les courbes sont représentées sur les figures. Dans la plupart des cas, une ligne droite représente convenablement la tendance, exceptée la ligne de base de la composante de Z AMOS.

Les écarts types des lignes de base obtenues à partir de chaque courbe sont données dans le tableau 4.7. Les valeurs D et I sont exprimées aussi bien en nT qu'en minutes pour faciliter la comparaison entre composantes.

Le tableau 4.7 montre que les écarts types des lignes de base calculées en utilisant les mesures absolues retenues sur le pilier E sont en générales plus petites que celles calculées en utilisant les mesures absolues obtenues sur le pilier A. Cependant, les deux séries de données ne sont pas directement comparables puisqu'elles contiennent des observations faîtes par différents observateurs à des moments différents et que beaucoup plus d'observations ont été faites sur le pilier A que sur le pilier E. Une discussion ultérieure portera sur les lignes de base obtenues sur le pilier A puisque la plupart des mesures ont été effectuées sur ce pilier.

Table 4.6 Lignes de base X Y et Z AMOS — Pilier E

		Y_{b1} (nT)		
Date	Obs2	Obs3	Obs4	Obs6
4 août	126.6	125.5	125.9	125.0
5 août	126.9	125.9		128.6
6 août				
7 août				127.1
				130.4
		Y_{b1} (nT)		
Date	Obs2	Obs3	Obs4	Obs6
4 août	72.1	72.5	73.1	72.2
5 août	72.4	73.8		72.8
6 août				
7 août				74.1
				73.7
		Z_{b1} (nT)		
Date	Obs2	Obs3	Obs4	Obs6
4 août	−85.4	−86.2	−85.4	−86.4
5 août	−85.9	−86.6		−86.8
6 août				
7 août				−84.1
				−84.9

Table 4.7 Écarts types des lignes de base obtenues

	Thomson Pilier A	Thomson Pilier E	ELSEC Pilier A	ELSEC Pilier E	AMOS Pilier A	AMOS Pilier E
D(')	.26	.138	.27	.029		
(nT)	(1.3)	(0.7)	(1.4)	(0.1)		
H(nT)	1.2	1.0				
Z(nT)	0.6	0.7			1.6	0.8
I(')			.089	.083		
(nT)			(1.5)	(1.4)		
X(nT)					1.3	1.2
Y(nT)					2.1	0.6
δF(nT)			0.3	0.3		

Les écarts types (pilier A) vont d'une valeur aussi faible que 0,6 nT (Thomson Z) à une valeur aussi grande que 2,1 nT (AMOS Y). Dans l'ensemble, les lignes de base AMOS présentent une dispersion plus grande que celles du Thomson-Sintra ou de l'ELSEC. Cependant, les F statistiques calculés montrent que seule la dispersion dans la ligne de base d'AMOS est significativement plus grande pour une barre d'erreur de 95 %. C'est dû au fait qu'une ligne droite n'est pas un bon ajustement pour obtenir les lignes de base.

En général, on considère l'écart type des lignes de base comme une mesure de l'erreur d'observation. Les erreurs de 1 à 2 nT sont considérées par plusieurs observateurs comme étant excessives. (voir par exemple le rapport de Sucksdorff et Kuwashima). Quelques-uns des facteurs qui pourraient contribuer à cette dispersion excessive, par exemple la contamination du bâtiment de mesure, ont déjà été mentionnés. De tel facteurs sont impossibles à évaluer et peuvent varier d'une observation à l'autre.

Il faut aussi considérer la possibilité d'existance de différences systématiques entre les instruments. La possibilité qu'une source de magnétisation demeure dans la théodolite semble peu probable. Une comparaison de plusieurs instruments au Institut de Physique du Globe nous a montré qu'il n'y a pas de différence au niveau de la resolution des instruments.

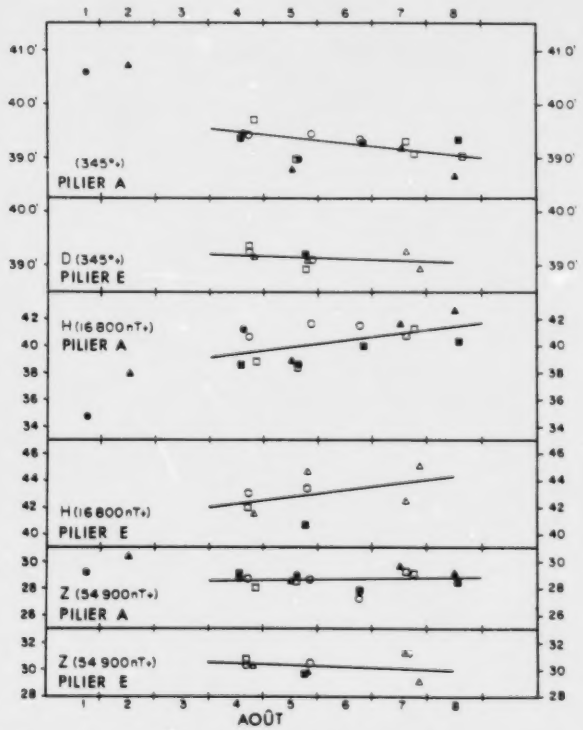


Figure 4.1 La détermination des lignes de base pour le magnétomètre Thomson-Sintra dérivée des mesures absolues prisent durant l'atelier sur Pilier A et Pilier E. Les lignes solides représentent les moindres carrés des lignes de bases individuelles. La notation pour les observateurs est la suivante: Observateur 1, ● Observateur 2, ○ Observateur 3, ■ Observateur 4, □ Observateur 5, ▲ Observateur 6, △

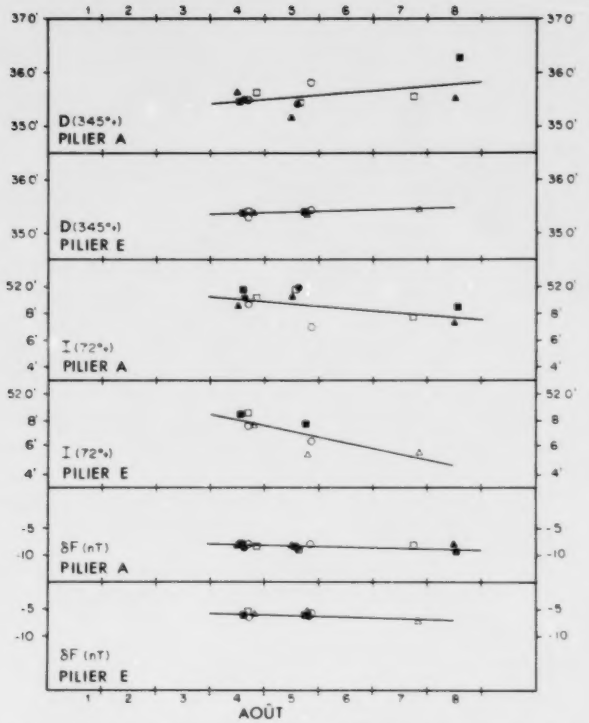


Figure 4.2 La détermination des lignes de base pour le magnétomètre vectoriel ELSEC PPM. (Voir l'explication des symboles à la figure 4.1.)

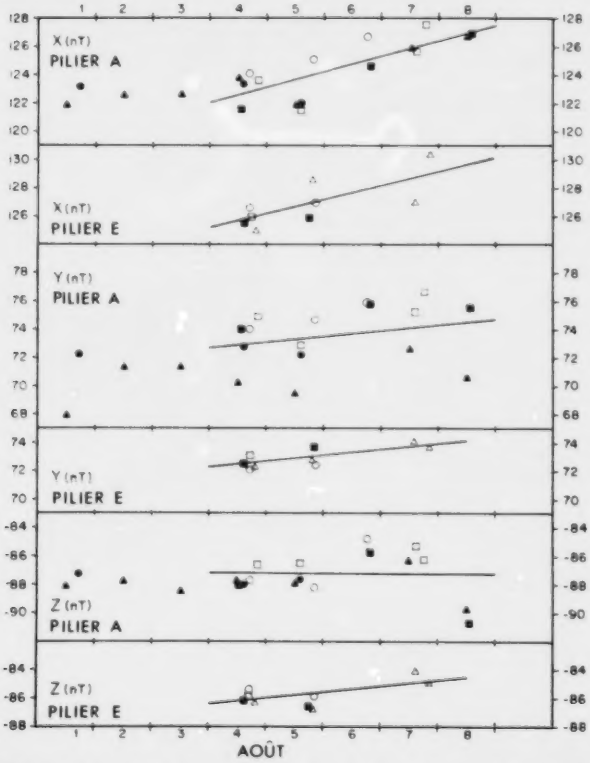


Figure 4.3 La détermination des lignes de base pour le système AMOS d'Ottawa. (Voir l'explication des symboles à la figure 4.1.)

Les figures 4.1 à 4.3 montrent que des différences des lignes de base obtenues par différents observateurs ne restent pas constantes d'un jour à l'autre. Par exemple, les lignes de base D du Thomson-Sintra obtenues par les observateurs 1 et 2 sont différentes de seulement 0,02′ le 4 août et de −0,47 le 5 août. Par ailleurs, les lignes de base X AMOS obtenues par l'observateur 3 et l'observateur 5, diffèrent de −2,3 nT le 4 août et de −0,1 nT le 8 août. L'indication la plus certaine d'une différence systématique est vue sur la ligne de base Y AMOS; ici les observations faites par les observateurs 2 et 3 sont constamment hautes, celles faites par l'observateur 5 constamment bases. Cependant, l'effet n'est pas aussi prononcé sur les lignes de base Thomson-Sintra ou ELSEC, et n'est pas aussi apparent dans les lignes de base du pilier E. En fait, les lignes de base D ELSEC déterminées au pilier E, ont un écart type de seulement 0.03′ ce qui indique que les différences entre les instruments peuvent être très petites. Les différences systématiques sont donc improbables pour rendre compte de la grande dispersion des lignes de base.

Puisque les mêmes observations ont été utilisées pour calculer les lignes de base des trois magnétomètres, les dessins des observations concernant la ligne de régression devraient montrer des allures similaires. Cependant, l'examen des figures 4.1 à 4.3 montre des différences marquantes. Par exemple: les lignes de base D (pilier A) obtenues par l'observateur 2 les 4 et 5 août. Pour le magnétomètre Thomson-Sintra, les lignes de base sont les mêmes pour les deux jours. Pour le magnétomètre ELSEC, les lignes de base diffèrent de 0,31′. Un autre exemple, les lignes de base Z du Thomson-Sintra et de l'AMOS: le 7 août, l'observateur 4 a fait deux mesures, les lignes de base Thomson calculées à partir de ces deux observations diffèrent de 0,2 nT tandis que celles de l'AMOS diffèrent de 1 nT.

Il est probable que cette grande dispersion dans les lignes de base soit due à des dérives rapides des variomètres triaxiaux. Une indication complémentaire de ceci est obtenue en calculant la différence RMC de la ligne de base déterminée par moindres carrés sur une base journalière. Dans plusieurs exemples, il apparaît qu'il y ait une corrélation directe entre la différence RMC et l'intervalle de temps (dt) pendant lequel ont été faites les observations absolues. Ceci est montré dans le tableau 4.8 pour tous les jours où au moins trois observations ont été faites.

Table 4.8 Différences RMC journalières

	4 août	5 août	6 août	7 août
Thomson				
δT	4.0 h	8.1 h	4.4 h	1.9 h
D	.14′	.32′	.10′	.34′
H	1.3	1.5	0.5	
Z	0.4	0.5	0.3	
AMOS				
δT	5.4 h	8.1 h	4.4 h	
X	1.0	1.7	1.0	
Y	1.7	2.2	0.8	
Z	0.6	0.8	0.6	
ELSEC				
δT	5.4 h	8.1 h		
D	.07′	.27′		
I	.05′	.14′		

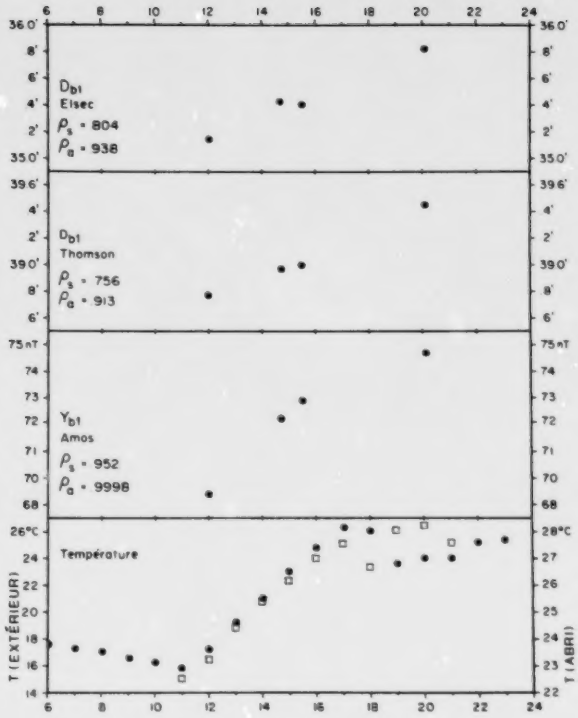


Figure 4.4 Variation avec le temps, le 5 août 1986, des lignes de base entre l'ELSEC D, le Thomson-Sintra D et le AMOS Y. On montre aussi la variation de température à l'intérieur de l'abri où est situé le Thomson-Sintra et la variation extérieure.

C'est le 5 août qu'on voit la plus grande dispersion, nous allons l'examiner. Les lignes de base D ELSEC et Thomson-Sintra pour ce jour là, sont dessinés sur la figure 4.4, ainsi que les lignes de base Y AMOS. Pour compléter on a également tracé les températures relevées dans le coffret placé sur le capteur Thomson-Sintra. La température officielle donnée par le bureau de la météorologie d'Ottawa est, également, portée sur cette figure. Les coefficients de corrélation entre les lignes de base et la température dans le coffret (ρ_s) et, la ligne de base et la température de l'air (ρ_a), sont également montrés sur la figure. Toutes ces corrélations sont très bonnes, quoique les corrélations avec la température soit plus haute. La corrélation la meilleure, est celle qu'on a entre la ligne de base AMOS et la température de l'air. Cependant ces températures ne correspondent pas nécessairement aux températures des variomètres ou de leurs capteurs. Par exemple, il est montré que le 5 août, la température du capteur AMOS est restée constante tout au long de la journée à $\pm 0{,}5$°C. La température de l'électronique de l'autre variomètre dans un bâtiment différent n'a pas été enregistrée continuellement, mais on pense qu'elle ne varie pas plus que 2°C . L'électronique de l'AMOS présente un coefficient de température d'approximativement 5 nT/°C pour la composante Y; une augmentation de température de 1°C durant ce jour apportera une variation en phase avec la température de l'air extérieure. Cette variation rendra compte de la dérive de la ligne de base observée.

Le variomètre Thomson-Sintra a un coefficient de température inférieur à 0,15 nT/°C pour le capteur et la console électronique. Si nous supposons que la température du capteur dans son coffret augmente approximativement de 4°C et que la température de la console augmente d'environ 10°C durant ce même jour, l'augmentation de la ligne de base de D sera d'environ 2,1 nT ou 0,42'. L'augmentation observée est de 0,67', et montre donc une bonne corrélation entre le calcul et l'observation d'autant que la température de l'air extérieure est seulement estimée.

C'est le meilleur exemple d'effet de température quoique un effet similaire soit à noter pour les lignes de base Y AMOS et celles de D du Thomson-Sintra.

Les effets de température sur les deux autres composantes ne sont pas aussi évidents mais pourraient être la cause de quelques unes des dispersions des lignes de base observées. Actuellement on ne connait pas le coefficient de température de l'ELSEC PPM vectoriel ni celui concernant l'effet de la variation de température dans son environnement.

Conclusions

Les conditions à l'atelier ont prouvé quelles étaient moins qu'idéales pour une comparaison précise des instruments de mesures absolues pour plusieurs raisons: éventuelle contamination magnétique du bâtiment de mesure, temps insuffisant pour un nombre adéquat d'observation, manque de variomètres triaxiaux suffisamment stables. Il est évident que l'AMOS d'Ottawa n'est pas assez stable en température pour permettre des comparaisons avec la précision d'une fraction de nanotesla (fait qui n'avait pas été complètement apprécié auparavant). Le Thomson-Sintra certainement, et probablement l'ELSEC auraient pu montrer cette stabilité s'ils avaient été installés sur des piliers corrects dans un environnement thermique stable.

Il est évident, que pour n'importe lequel des futurs ateliers un magnétomètre de grande qualité doit être installé avant que des comparaisons de mesures absolues commencent. Il devrait être aussi bénéfique de continuer les séries d'observations absolues pendant quelques jours après la fin officielle de l'atelier quand les activités générales sont moindres.

Différents pays procèdent à des comparaisons d'instruments de manière routinière. L'avis de ces pays, aurait pu être bénéfique pour la préparation de cette réunion et il ne faudra pas négliger cet aspect lors de la préparation d'un futur atelier.

Les résultats de notre comparaison indiquent que, même dans des conditions difficiles, les lignes de base peuvent être déterminées avec des erreurs qui ne sont supérieurs à 2 nT. Il est hautement probable que sous des conditions plus favorables, les seuils d'erreurs seraient

inférieurs à 1 nT avec le DI Flux et le magnétomètre Sokkisha, quoique les observations que nous avons faites ne permettent pas de commentaire sur la précision ultime de ces instruments. Il est difficile de détecter avec une quelconque certitude des différences systématiques entre les instruments ou les observateurs à cause de l'instabilité des variomètres triaxiaux utilisés. Cependant, si de telles différences existent, elles doivent être petites.

Un des aspect les plus important de l'atelier a été l'opportunité qu'il a présenté pour les observateurs et les autres délégués de comparer diverses techniques de mesures et d'observations. Si ceci conduit à une amélioration éventuelle des méthodes d'observations pour une homogénéité dans les résultats alors, cet atelier aura été bénéfique à tous.

Bibliographie

Bitterly, J., Cantin, J.M., Schlich, R., Folques, J. et Gilbert,D.
1984: Portable magnetometer theodolite with fluxgate sensors for earth's magnetic field component measurements; in Geomagnetic Observatory and Survey Practice, ed. W.F. Stuart; Geophysical Surveys, v.6, p.233-239.

Jansen van Beek, G. et Loomer, E.I.
1982: Annual report for magnetic observatories-1979; Direction de la Physique du globe, Série géomagnétique n° 22.

Kring Lauridsen, E.
1985: Experience with the DI-fluxgate magnetometer inclusive theory of the instrument and comparision with other methods; Danish Meteorological Institute, Geophysical Papers R-71, Copenhagen.

Serson, P.H. and Hannaford, W.L.W.
1956: A portable electrical magnetometer; Canadian Journal of Technology, v.34, p.232-243.

Wienert, K.A.
1970: Méthodes d'observation et de prospection géomagnétiques; UNESCO, Paris, 223 p.

5. COMPARAISONS DE VARIOMÈTRES NUMÉRIQUES

MISE EN FORME DES DONNÉES

G. Jansen van Beek et L.R. Newitt

Introduction

Les discussions qui ont eu lieu pendant l'atelier et un grand nombre des rapports contenus dans le présent compte rendu portent sur des sujets actuels et pertinents tels que le contrôle absolu et la stabilité des variomètres. Cependant, peu a été dit au cours de l'atelier sur la mise en forme et le traitement des données.

La mise en forme des données en soi est une tâche plutôt effacée et peu emballante lorsque les données ne comportent aucune erreur de présentation et de qualité (valeurs aberrantes). Cela a été le cas pour la plupart des données dont il a été question à l'atelier. Néanmoins, certaines directives utiles ont été élaborées pendant le traitement des données. Une brève discussion de chaque ensemble de données particulier sera rapportée, suivie de renseignements sur la mise en forme des résultats de l'atelier et de recommandations concernant tout futur atelier sur les observatoires magnétiques dont l'accent pourrait être mis sur les données numériques et leur traitement.

Ensembles de données à plusieurs composantes

Commission géologique du Canada

Le traitement des données pour l'AMOS et le PPM ELSEC vectoriel n'a présenté aucun problème particulier. Heureusement, les deux systèmes étaient en exploitation bien avant l'atelier.

Les réparations apportées au PPM ELSEC vectoriel ont été effectuées par C. Chapman au début de l'atelier. Il s'agissait de remplacer une puce dans la partie entrée-sortie des données des circuits électroniques et n'a pas eu d'incidence sur la stabilité ou la sensibilité du variomètre.

L'AMOS a servi à enregistrer les composantes X, Y, Z et F, et le PPM vectoriel a servi à enregistrer les composantes D, I et F du champ magnétique terrestre. Les deux systèmes de coordonnées différaient du système de coordonnées de D, H, Z et F utilisé par tous les autres participants à l'atelier. Par conséquent, on a fait subir aux données une rotation suivant les formules suivantes:

$$\delta D = \sin^{-1}(Y/H) - QD$$
$$\delta D' = H\sin^{-1}(\delta D)$$
$$H = (X^2 + Y^2)^{1/2}$$
$$I = \sin^{-1}(\delta I'/F) + Ibl$$
$$Z = F\sin(I)$$
$$H = F\cos(I)$$

où:

- δD = variation de la déclinaison en unité angulaires
- QD = niveau de quiétude de la déclinaison en unités angulaires
- $\delta D'$ = variation de la déclinaison en nT
- H = intensité horizontale en nT
- X = composante nord du champ magnétique en nT
- Y = composante est du champ magnétique en nT
- $\delta I'$ = variation de l'inclinaison en nT
- Z = composante verticale du champ géomagnétique en nT
- F = intensité totale du champ magnétique en nT
- I = inclinaison en unités angulaires
- Ibl = ligne de base de l'instrument pour l'inclinaison en unités angulaires.

Lorsque les tracés des ensembles de données après rotation ont été juxtaposés, on a noté que les données après rotation du PPM ELSEC vectoriel et que les données après rotation de l'AMOS MK III présentaient des différences de sensibilité apparentes. Les comparaisons avec d'autres ensembles de données enregistrées en D et en H n'ont pas permis de déterminer quel variomètre était défectueux. Néanmoins, les deux ensembles de données après rotation ainsi que les ensembles de données originaux ont été entrés dans le fichier de données de l'atelier.

EDA Instruments Inc.

Les données à quatre composantes de l'AMOS d'EDA ont été enregistrées au moyen d'une enregistreuse à bande magnétique et sur la bande magnétique fournie par EDA. La bande magnétique a été traitée par la Division de géophysique. La lecture de la bande a fait ressortir de nombreux problèmes qu'avait posé le traitement des données sur des bandes enregistrées au moyen d'un AMOS MKI de la Direction de la physique du globe. Les problèmes que posent les bandes magnétiques se reconnaissent habituellement par la détérioration graduelle des données avec le temps. Malheureusement, cela est manifestement le cas pour l'ensemble des données de l'AMOS d'EDA car certaines données sont manquantes vers la fin de la période d'enregistrement.

U.S. Geological Survey (USGS)

Le traitement des données a été effectué à la maison mère de Denver (Colorado) après que plusieurs tentatives pour transférer les données de l'ordinateur personnel de saisie des données de l'USGS sur un autre ordinateur personnel ont échoué au moment de l'atelier.

L'ordinateur personnel de l'USGS a été endommagé au cours du transport vers Boulder, mais le taux de récupération des données stockées sur le disque rigide a été très élevé (si on considère que le disque rigide a dû tôt ou tard être placé dans un autre ordinateur personnel). Néamoins, certaines des données condensées binaires originales ont été endommagées. Dans certains cas, les bits d'information moins/plus ont été perdus à cause d'une inversion soudaine de la pente des courbes des composantes; des exemples sont donnés ailleurs dans le présent compte rendu.

Institut finlandais de météorologie/Institut polonais de géophysique

Les données ont été traitées sur place par les participants finlandais à l'atelier. Le traitement a produit des ensembles de moyennes et de valeurs instantanées à des fréquences d'échantillonnage de soixante secondes, dix secondes et cinq secondes.

Ce variomètre a été délibérément soumis à la plus forte variation de température possible. Malheureusement, certaines données de température ont été perdues.

Institut de physique du globe de Paris

Une partie des données de variation magnétique de THOMSON-SINTRA a été mise directement sur une plateforme de saisie des données à des fréquences d'échantillonnage de 8 secondes. Une autre partie des données d'une minute (du 3 au 6 août) a été entrée sur perforatrice à partir des imprimés fournis par Daniel Gilbert. Les données ont été traitées par la Division de géophysique.

Institut Eotvos, Budapest

Les données de DIMARS ont été traitées sur place par les participants hongrois à l'atelier. Comme les lectures du magnétomètre n'ont pu être relevées directement en nanoteslas, la sensibilité des données a été par la suite ajustée par la Division de géophysique par rappport aux données POLE/FIN fournies par l'Institut finlandais de météorologie.

Dowty Electronics Ltd.

Les données de DOWTY ont été recueillies à des fréquences d'échantillonnage de 8 secondes et traitées par la Division de géophysique, de la même façon que les données de Thomson-Sintra.

Données à une composante

Les données à une composante qui ont été entrées dans le fichier des données de l'atelier sont celles que contenaient les mémoires internes des divers magnétomètres à protons. Les données ont été transférées sur les ordinateurs personnels et sur des disquettes souples au moyen d'un protocole de communication commercial (CROSSTALK). Le traitement des données a été effectué par la Division de géophysique.

Commentaires sur le traitement des données

La mise en forme des données a été limitée autant que possible à la réorganisation des données suivant une présentation uniforme. Les données aberrantes ont été éliminées seulement lorsqu'elles nuisaient au programme de traçage. Ce n'est que dans les données d'EDA à 4 composantes qu'il a fallu filtrer les données et remplacer des caractères pour récupérer autant de données que possible.

Même si la manipulation des données en termes de qualité a été maintenue à un minimum, le processus de mise en forme a été compliqué car chaque ensemble de données avait sa propre présentation et comportait des difficultés particulières, par exemple l'impossibilité d'imprimer certains caractères. Les gros ordinateurs centraux ne posent en général aucune difficulté pour ce qui est des retours de chariot et des changements de ligne supplémentaires, mais les ordinateurs personnels, basés sur les compilateurs Fortran actuels, ne possèdent pas ce niveau de sophistication.

Un effort a été fait pour remplir de valeurs nulles (valeurs supérieures à 800 000) les courtes périodes de données manquantes. Par conséquent, les fichiers de données sont toujours continus, mais ne sont pas nécessairement remplis de données réelles. Chaque fois qu'un grand nombre de données manquaient (c'est-à-dire un grand nombre de points de données), un nouvel enregistrement en-tête a été créé même si cela pouvait conduire à la présence simultanée de deux enregistrements en-tête pour une journée et un ensemble de données particuliers.

Une indication visuelle de la disponiblité des données à plusieurs composantes est présentée ailleurs dans le compte rendu.

Mise en forme des données

Après consultation d'un certain nombre de spécialistes en matière de saisie/mise en forme des données ou d'architecture des ordinateurs personnels, il a été décidé d'utiliser la structure de fichier suivante:

— le fichier contient des enregistrements de longueur fixée à 1024 caractères chacun
— chaque enregistrement doit être lu suivant la commande d'édition comme étant 12818
— les valeurs de remplissage d'un enregistrement sont 999999
— chaque ensemble de données d'un jour est initialisé au moyen d'un enregistrement en-tête contenant les renseignements pertinents sur les données
— l'enregistrement en-tête est suivi de deux enregistrements qui contiennent les données de température en unités de 0,1°C
— les enregistrements de température sont suivis d'un nombre entier d'enregistrements suffisant pour contenir toutes les données pour l'intervalle défini par les temps de départ et d'arrêt dans l'enregistrement en-tête, c'est-à-dire que les données pour chacune des composantes énumérées dans l'enregistrement en-tête sont inscrites à la suite (note: la description des composantes ne figure pas dans les enregistrements des données)
— l'intervalle des données est continu et les temps de début et de fin sont définis dans l'enregistrement en-tête
— les valeurs nulles sont celles qui sont supérieures à 800 000.

L'enregistrement en-tête contient les renseignements suivants sur les données:

Élément de données	Description
1	— indicatif de station AIGA (45284 pour Ottawa)
2	— identificateur d'ensemble de données
3	— quantième du mois
4	— numéro du mois
5	— année
6	— quantième de l'année
7	— heure de début des données (TU)
8	— minute de début des données (TU)
9	— seconde de début des données (TU)
10	— heure de fin des données (TU)
11	— minute de fin des données (TU)

12 — seconde de fin des données (TU)
13 — fréquence d'échantillonnage des données magnétiques en secondes
14 — 21 — indicateurs de composantes; la présence d'une composante est indiquée par sa valeur numérique, autrement l'indicateur contient un zéro
14 — composante X
15 — composante Y
16 — composante Z
17 — déclinaison D en nanoteslas
18 — intensité horizontale H
19 — intensité totale F
20 — inclinaison I en nanoteslas
21 — autres
22 — facteur numérique de multiplication des données
23 — fréquence d'échantillonnage des données de température en secondes
24 — 128 — valeur nulle remplacée par des 999999.

L'identificateur de l'ensemble de données peut être représenté par BMMII où: B est le numéro du bâtiment dans le complexe de l'observatoire d'Ottawa;
MM est le numéro du fabricant ou de l'institut propriétaire,
01 — AMOS MKIII de la CGC
02 — EDA Instruments Inc.
03 — USGS
04 — Littlemore Scientific Engineering Co.
05 — Institut finlandais de météorologie
06 — Institut de physique du globe de Paris (vanne de flux triaxial Thomson-Sintra)
07 — GEM Systems Inc.
08 — Institut Eotvos, Budapest (DIMARS)
09 — Dowty Electronics Ltd.
10 — Scintrex Ltd.
et II est le numéro de l'ensemble de données.

Par exemple, l'identificateur d'ensemble de données 50401 correspondrait à un instrument du bâtiment 5, dont le fabricant est Littlemore, et à l'ensemble de données identifié par le numéro 1.

La bande magnétique des données de l'atelier

Une bande magnétique contenant les données finales de température et de variation magnétique a été compilée et est disponible sur demande. Les ensembles de données sont décrits ci-dessous dans l'ordre:

	Identificateur d'ensemble de données	Description
1.	80801	DIMARS, données d'une minute
2.	80901	DOWTY, données de 8 secondes
3.	30201	EDA AMOS, données d'une minute
4.	30102	AMOS MKIII CGC, données de 10 s
5.	80701	PPM GEM GM6743, données de 5 s
6.	80703	PPM GEM GM6747 OVERHAUSER, données de 5 secondes
7.	81001	PPM SCINTREX MP3, données d'une minute
8.	80202	PPM EDA OMNI4, données de 5 secondes
9.	80202	PPM EDA OMNI4, données de 10 secondes
10.	30101	AMOS MKIII CGC, données d'une minute avec rotation
11.	30101	AMOS MKIII CGC, données d'une minute
12.	60503	POLE/FIN, moyennes de 5 s
13.	60504	POLE/FIN, moyennes de 10 s
14.	60505	POLE/FIN, données instantanées de 10 secondes
15.	60502	POLE/FIN, données instantanées d'une minute
16.	60501	POLE/FIN, moyennes d'une minute
17.	70601	THOMSON-SINTRA, données de 8 s
18.	30301	USGS, données d'une minute
19.	50401	PPM LITTLEMORE VECTOR, données de 30 secondes avec rotation
20.	50401	PPM LITTLEMORE VECTOR, données de 30 secondes
21.	70601	THOMSON-SINTRA, données d'une minute entrées sur perforatrice
22.	80702	PPM GEM GM6746 OVERHAUSER, données de 5 secondes

NOTE: l'exclusivité de chaque ensemble de données est indiquée par l'identificateur de l'ensemble de données et par les autres paramètres contenus dans les enregistrements en-tête de données.

Recommandations

Pour les prochains ateliers sur les observatoires magnétiques qui porteraient sur une variété de données numériques, les auteurs font les recommandations suivantes:

1. Si les données doivent être traitées par l'organisme hôte en temps semi-réel, des échantillons de données numériques devraient être soumis au moins deux mois avant l'atelier.
2. Les enregistrements devraient s'inscrire à l'intérieur d'une combinaison simple de retours de chariot (ASCII 13_{10})/changements de ligne (ASCII 10_{10}). L'addition de caractères non imprimables supplémentaires (ASCI 00_{00} à 31_{10}) consistue un véritable cauchemar pour les programmeurs.
3. Les données devraient être présentées en code ASCII et se prêter à des corrections effectuées au moyen d'un programme de mise en forme sur écran qui fonctionne de préférence sur un ordinateur personnel. Cela signifie en outre que les variations géomagnétiques telles que décrites numériquement doivent pouvoir être reconnues par la personne chargée de la mise en forme. Ainsi, une attention particulière doit être accordée à la compression des données de façon à préserver la « lisibilité » des données.
4. Les ensembles de données qui doivent être utilisés à des fins de comparaison devraient être échantillonnés à la même fréquence. L'établissement de moyennes peut toujours être effectué à une date ultérieure si le débit des données est assez élevé.

Les auteurs sont d'avis que les recommandations 2 et 3 sont d'application générale. En particulier, le logiciel d'application contenu à même les processeurs des instruments devrait être rédigé de façon que les données résultantes soient à la portée de l'utilisateur.

COMPARAISON DE VARIOMÈTRES NUMÉRIQUES

R.L. Coles et D.F. Trigg

Introduction

L'atelier a permis de recueillir des données fournies par 7 variomètres numériques fonctionnant en permanence ou une partie du temps. Cette communication présente quelques unes des observations initiales basées sur des comparaisons en grande partie qualitatives entre les différents ensembles de données fournis par ces instruments. La figure 5.1 montre la disposition des instruments dans la zone réservée non magnétique; sa légende donne les codes des instruments examinés dans cette publication. Les capteurs TS, UR et EA étaient montés sur des piliers en béton fixés dans le sol à l'extérieur, et surmontés de boîtes en matériau isolant. Les capteurs PF et EL étaient montés sur des piliers en béton, eux-mêmes fixés sur les planchers en béton des bâtiments n° 6 et n° 5 (respectivement). Les capteurs DM étaient montés sur des boulons en laiton fixés sur la dalle de béton du petit bâtiment (n° 7A) isolée en fibre de verre. Les capteurs OA sur leur base en permali étaient fixés sur la dalle de béton du bâtiment n° 2. La température était mesurée au niveau des capteurs de tous les instruments, sauf pour EL. L'électronique d'enregistrement des données pour tous les instruments était implantée dans les bâtiments. À l'exception des préamplificateurs de TS et UR, l'électronique des capteurs était également à l'intérieur des bâtiments.

Les capteurs des magnétomètres à vanne de flux du Réseau canadien d'observatoires magnétiques sont orientés par rapport aux coordonnées géographiques: nord, est et axe vertical dirigé vers le bas. L'objet de cette orientation commune est d'assurer l'uniformité du réseau, qui s'étend de part et d'autre de la ligne agonique et entoure le pôle magnétique nord (pôle d'inclinaison). Le système d'Ottawa (OA) enregistre donc les composantes X, Y et Z. Le magnétomètre à précession de protons (MP) vectoriel d'Ottawa (EL) est orienté pour mesurer delta D, delta I et F.

Pour des raisons pratiques, pendant l'atelier, les capteurs des autres instruments inclus dans l'expérience étaient orientés par rapport au méridien magnétique et enregistraient D, H et Z. La valeur moyenne de D à Ottawa en 1986 était de 345° 40,0′.

Afin de pouvoir comparer les ensembles de données fournies par les différents variomètres, les données XYZ de OA et les données DIF de EL ont été converties par rotation en données DHZ,comme indiqué précédemment.

Disponibilité des données

La figure 5.2 indique approximativement les intervalles de temps pendant lesquels les participants à l'atelier ont pu obtenir des données numériques. (Remarque: dans certains cas, les opérateurs de certains instruments pourraient fournir des ensembles de données plus complets.) Le rassemblement d'un tel nombre de systèmes différents pose un certain nombre de problèmes. Des donnés de température et du champ magnétique n'ont pu être recueillies au même moment pour l'ensemble des systèmes que pendant des intervalles de temps limités entre les jours 215 et 218. À ce stade, on doit mentionner les difficultés posées par le rassemblement de tous ces ensembles de données sous un format commun permettant leur affichage et leur répartition, difficultés allant de la conversion des formats, à la détection et l'élimination des caractères non imprimables.

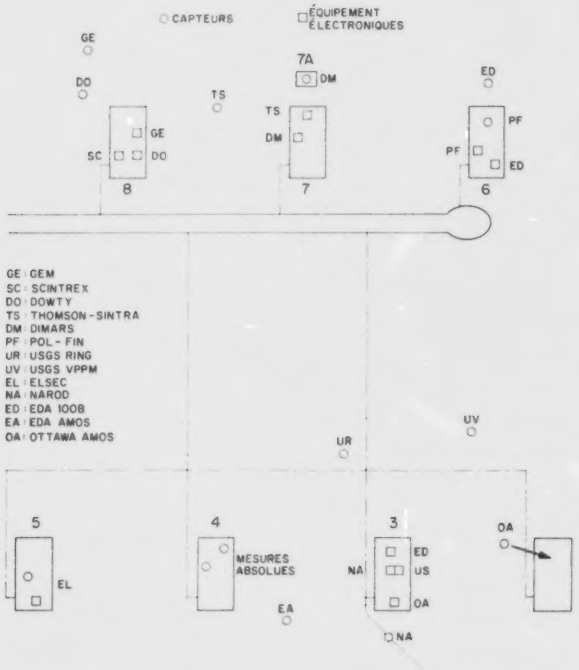


Figure 5.1 Distribution des instruments de l'atelier sur le terrain du complexe non-magnétique.

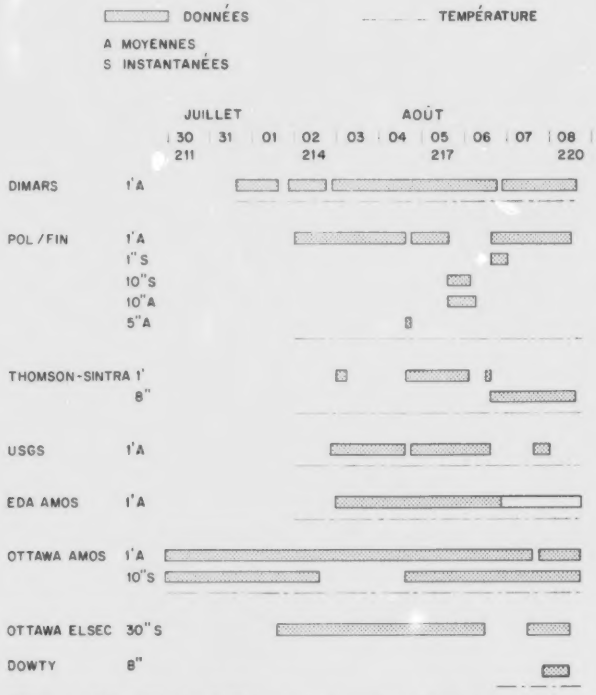


Figure 5.2 Disponibilité des données digitales 3 composantes durant l'atelier.

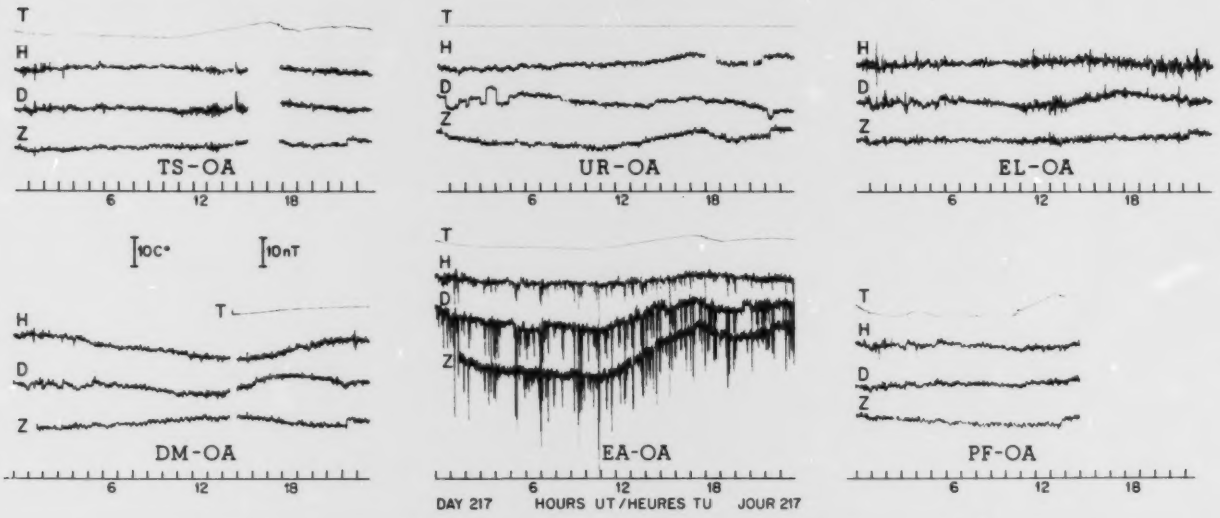


Figure 5.3 Différences entre les variomètres de l'atelier et le variomètre de référence d'Ottawa (AMOS) pour le jour 217. T signifie température, H pour la composante horizontale, D pour la déclinaison et Z pour la composante verticale. Le code des instruments est défini à la figure 5.1.

Ces difficultés sont décrites plus en détail à une section précédente du présent compte rendu.

On doit également reconnaître que, par suite de la nature temporaire de certaines des installations, la continuité, l'enregistrement et la qualité des données peuvent ne pas être aussi bonnes que celles de donnés provenant d'une installation permanente. Les conclusions sur les différents instruments doivent tenir compte de ce facteur.

Ensemble de données de référence

Bien qu'il puisse sembler présomptueux de choisir à priori l'un des instruments comme instrument de référence auquel seront comparés tous les autres, il est utile de disposer d'un standard temporaire. L'examen visuel du tracé des données montrait clairement que les traces qui se recoupaient le mieux étaient celles de EL et OA et, de TS et OA. OA était le système dont la température était la plus constante (salles climatisées). Nous avons donc déterminé les différences entre chacun des instruments et OA. La figure 5.3 montre, par exemple, les différences entre les données recueillies pendant le jour 217. (On remarquera que les caractéristiques résultant de dérives ou d'irrégularités dans la trace de référence OA se retrouvent comme caractéristiques communes dans toutes les autres traces.)

Comme la presque totalité des systèmes enregistraient la plupart du temps à intervalles de 1 minute, les comparaisons entre les différences de lectures ont été effectuées avec un intervalle d'échantillonnage d'une minute. Dans le cas de EL, les données de base recueillies à intervalles de 30 s ont été ramenées à un échantillonnage de 1 minute.

Inconsistances locales des données

Des étalonnages empiriques ont été effectués pour DM par comparaison avec PF en utilisant de grandes excursions du signal, parce qu'on ne disposait d'aucune valeur de sensibilité.

Certains instruments présentaient, à certains moments, des signes évidents de manque de suivi pour les signaux à courte période. Une partie de ce défaut peut être le résultat d'un mauvais ajustement; elle se manifeste par une activité commune sur des courbes de mesure de différence pendant les périodes actives. Une autre cause peut être un défaut d'alignement des capteurs, conséquence de la nature temporaire de la plupart des installations. Un manque d'orthogonalité des capteurs peut également être un facteur contributif.

Dans le cas de UR, on sait qu'une partie du manque de suivi résulte de difficultés d'extraction de données codées dans un format binaire condensé, du fait des dommages subis par un ordinateur au cours du transport. Ce défaut se manifestait par des inversions soudaines de certaines parties de la trace.

Un décalage remarqué sur toutes les courbes de mesure différentielle de Z peu après 22h00 (TU) le jour 217 doit être attribué à OA, bien que ce décalage ne puisse pas être identifié de manière positive sur la courbe de mesure de OA, par suite de la présence simultanée d'une activité géomagnétique.

Le signal de données de certaines traces présentait des pointes d'amplitude. Leurs causes ne peuvent pas être aisément identifiées, mais certaines peuvent avoir été provoquées par l'utilisation d'alimentations temporaires, d'autres par des participants trop curieux, et d'autres encore par des défauts de fonctionnement des instruments ou des enregistreurs.

Le contenu HF relativement important des courbes de mesure EL-OA est vraisemblablement relié au fait que les données de EL sont essentiellement des données ponctuelles dérivées d'une suite de mesures sur le PPM vectoriel, alors que les données OA sont des moyennes sur 1 minute obtenues par filtrage.

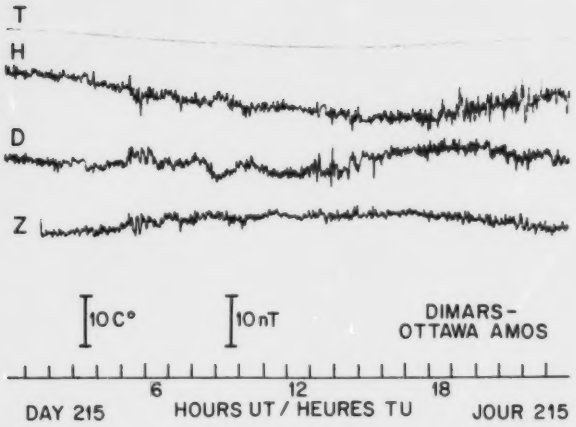


Figure 5.4 Différences entre le magnétomètre photoélectrique à torsion Hongrois DIMARS et le AMOS III d'Ottawa pour le jour 215.

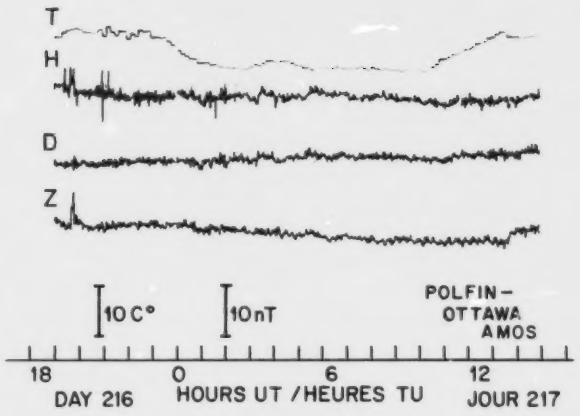


Figure 5.5 Différences entre le magnétomètre photoélectrique à torsion de la Finlande et le AMOS III d'Ottawa pour les jours 216-217.

Les pointes d'amplitude des courbes de mesure EA-OA sont plus préoccupantes. Elles sont probablement dues à des problèmes de fonctionnement du magnétomètre à vanne de flux ou de conversion analogique-numérique dans le système EA, étant donné que les courbes de données F du PPM du système EA, tracées à titre de comparaison, ne montrent pas de pointes comparables.

Dérives à long termes

Notre première opération a consisté à chercher des caractéristiques communes à toutes les traces et à considérer si ces caractéristiques étaient ou non attribuables à OA. Nous savions que certaines corrélations pouvaient être négatives. En fait, toutes les courbes de mesure différentielle de D montraient des formes semblables, quelquefois superposées à d'autres dérives. Nous avons donc attribué à OA une portion de la dérive de la courbe de mesure différentielle de D. OA suivait très bien EL et TS en H et en Z et nous sommes sûrs que OA présente une dérive très faible pour ces composantes dans l'intervalle de temps étudié.

DM était installé dans un bon environnement thermique et sa courbe de température montre des variations beaucoup plus amorties, avec un retard de 4 heures environ sur la courbe des températures extérieures (figure 5.4). Les courbes de mesure différentielle de Z et de H montrent des corrélations nettes avec la température de l'enceinte du capteur (environ 3 nT/°C pour H et 1 nT/°C pour Z). La courbe de mesure différentielle de D présente un caractère très différent, semblable à celui des courbes de mesure différentielle de D des autres systèmes. Nous en avons donc conclu que le coefficient de température de D et qu'une grande partie de la dérive apparente de la courbe de mesure de D étaient probablement attribuables à OA. La compensation de température pour H et Z dans le système DM semble ne pas avoir été suffisante, probablement à cause de la nature temporaire de l'installation.

Les courbes de mesure différentielle de Z et de H de PF-OA présentaient une faible corrélation avec la température. Comme la courbe de mesure différentielle de D

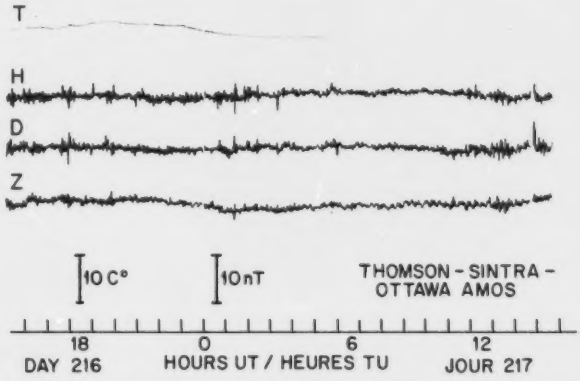


Figure 5.6 Différences entre le magnétomètre à vanne de flux Thomson-Sintra de France et le AMOS III d'Ottawa pour les jours 216-217.

présentait peu de variations, la composante D de PF dérivait probablement de la même manière que OA. Un deuxième tracé (figure 5.5) montre un cycle de température plus complet.

TS et OA se suivaient de près dans la plus grande partie de l'intervalle de temps, avec un écart maximal de 1 nT, sauf vers 18h00 (TU) le jour 217, moment où l'on a relevé des différences de l'ordre de 2 nT pour D. Ces dernières différences, comme nous l'avons dit précédemment, sont vraisemblablement attribuables à OA. Un deuxième tracé (figure 5.6) montre de manière plus complète les dérives mesurées au cours d'une journée.

Les courbes de mesure différentielle de UR montrent une corrélation avec la température extérieure. La température des capteurs, contrôlée par deux systèmes indépendants (un dans le système USGS et l'autre mis en oeuvre par le technicien de l'atelier), était d'une stabilité surprenante. Les dérives observées semblaient provenir de l'électronique qui était soumise à des fortes variations de température. La figure 5.7 montre l'influence de la température de la salle où se trouvait l'électronique au cours de la période pendant laquelle ces mesures ont été effectuées.

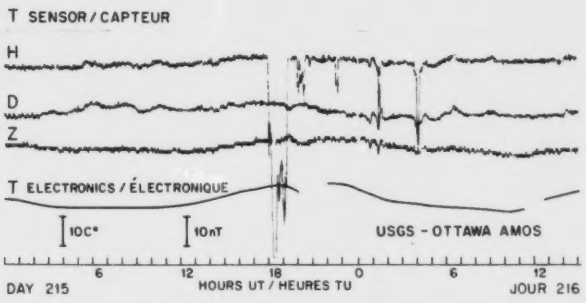


Figure 5.7 Différences entre le magnétomètre à noyau annulaire des Etats-Unis et le AMOS III pour les jours 215-216.

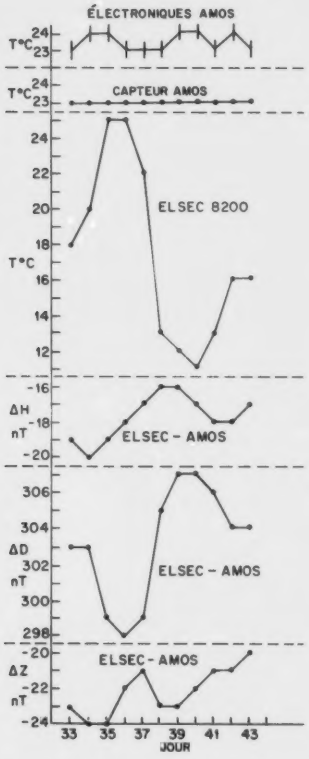


Figure 5.8 Effet de la température sur le magnétomètre à protons ELSEC 8200 entre les jours 33 et 34, 1987.

Les courbes de mesure différentielle de EA présentaient des dérives considérables. L'électronique de ce système était dans le même environnement que celle de UR. La dérive était inférieure à 1 nT/°C pour H, d'environ 2 nT/°C pour D et d'environ 3 nT/°C pour Z. Nous n'avons aucun moyen de distinguer entre la dérive due au capteur et celle due à l'électronique.

Malheureusement, les données de température pour EL n'étaient pas disponibles pour la durée de l'atelier. Toutefois, comme EL fait maintenant partie permanente de l'installation de l'observatoire d'Ottawa, nous avons par la suite pu contrôler étroitement les variations de température et de champ pour EL et OA. Au cours du mois de février 1987, nous avons effectué un essai spécifique de température. L'AMOS d'Ottawa (OA) a été maintenu à une température stable (les capteurs étaient en permanence à 23°C; et l'électronique à une température nominale de 23°C à 24°C, bien que les fluctuations des dispositifs de chauffage aient provoqué quelques effets mineurs à court terme pendant des périodes de 3 heures environ). La température du PPM vector (EL), y compris de son capteur, de ses bobines et de son électronique a été modifiée lentement dans une large plage pendant une période de 10 jours.

La figure 5.8 montre les résultats obtenus. On observe une corrélation nette entre la température et delta D, avec un coefficient de température d'environ $-0{,}6$ nT/°C. Moins net, mais tout aussi révélateur, est l'effet sur delta H, avec un coefficient de l'ordre de $-0{,}2$ nT/°C. Tout effet de la température sur delta Z, en demeurant faible, est masqué par le bruit ou d'autres phénomènes.

EL suivait bien OA pendant la période de l'atelier, sauf en ce qui concerne D. Comme nous l'avons dit précédemment, nous avons attribué en grande partie à OA les variations de la courbe de mesure différentielle de D.

Magnétomètres à protons

Les magnétomètres à précession à protons (PPM) sont considérés comme des appareils de mesure absolus (voir cependant les commentaires de W.F. Stuart à ce sujet dans la section 7). L'objectif principal de ce rapport était d'examiner certaines comparaisons entre des variomètres, mais nous avons considéré qu'il était utile d'effectuer des comparaisons semblables sur des PPM. Plusieurs des PPM de l'atelier fonctionnaient pendant de longues périodes (PPM AMOS d'Ottawa, PPM AMOS EDA, Elsec 8200, Elsec 820, Scintrex MP3, et PPM de l'USGS) tandis que d'autres étaient installés de manière moins permanente (les PPM GEM et l'Omni IV EDA).

Nous ne montrerons pas de courbes des données obtenues, car leur examen montre que les différents ensembles de données présentaient un accord remarquable, à quelques exceptions près. Un des orages électriques qui se sont produit pendant l'atelier a provoqué une panne du magnétomètre à protons AMOS d'Ottawa qui, bien qu'elle n'ait pas eu d'effet sur les moyennes à long terme, a donné une augmentation du bruit HF superposé au signal. Certains PPM portatifs fournissaient des donnés présentant un grand nombre de pointes d'amplitude d'origine inconnue.

Toutefois, la véritable question qui se pose pour la comparaison de magnétomètres à protons, celle de leur justesse, ne pouvait pas être traitée au cours de cet atelier. C'est le rôle des fabricants et des utilisateurs de développer des procédures systématiques d'ajustement faisant intervenir plusieurs instruments, en se basant sur les commentaires de la section 7.

Conclusions

En conclusion, nous devons mentionner plusieurs effets qui peuvent provoquer des erreurs graves dans les mesures du champ magnétique. Ces problèmes ont, jusqu'à présent, été abordés moins sérieusement, mais nous ne pouvons les ignorer.

L'effet le plus évident, comme le montrent clairement les résultats dont fait état ce rapport, est celui de la température. Les changements de température peuvent avoir des répercussions non seulement sur les caractéristiques des capteurs à vanne de flux ou autres, mais aussi sur les dimensions des bobines (surtout les plus grandes) et, élément important, sur l'électronique associée aux capteurs. Les dispositifs électroniques analogiques, y compris les convertisseurs analogiques/numériques, sont par nature sensibles à la température. Les circuits d'annulation du champ ambiant sont eux aussi sujets à des problèmes de température.

Un élément critique pour la précision de la mesure du champ magnétique et, pour profiter de l'excellente sensibilité des instruments, est la mesure et l'ajustement complet des caractéristiques de température des magnétomètres, non seulement à partir des caractéristiques de conception et de construction, mais par des mesures réelles sur le terrain et par des comparaisons.

Les méthodes de compensation de température dépendent souvent d'un champ magnétique ambiant, fourni par un aimant ou par des bobines parcourues par un courant, ou toute autre méthode. Le soin avec lequel est effectué le contrôle de la compensation de température au lieu d'implantation définitif d'un appareil qui ne présente aucun autre problème, peut être un élément critique de son installation.

L'inclinaison pris par les capteurs est un autre problème sérieux, tant à long terme qu'à court terme. Il peut être provoqué, entre autres, par des changements de température non uniformes dans le pilier de fixation. En fait, des dérives constatées sur certains instruments peuvent avoir été provoquées par des mouvements de piliers récemment installés, plutôt que par un effet direct de la température sur les magnétomètres. Il n'existe actuellement aucun appareil pour mesurer l'inclinaison. L'enregistrement de ce paramètre et la correction des données en fonction de l'inclinaison est logiquement la prochaine opération à effectuer sur les systèmes des observatoires magnétiques.

6. STANDARDS DISPONIBLES DANS LES OBSERVATOIRES MAGNÉTIQUES

Durant les discussions sur les observatoires magnétiques, quelques questions importantes mais délicates se sont posées et demeurent encore sans réponse:

1. Que doit-être la qualité d'un observatoire géomagnétique?
2. Peut-on classifier les observatoires en première classe, deuxième classe et ainsi de suite? Doit-on le faire?

Pratiquement, les besoins de la science doivent répondre à cette première question et ceux-ci sont décrits en parties par Niblett and Coles dans leur article de ce compte-rendu. Les articles suivants présentent quelques exemples reliés à ces questions.

QUELLE PRÉCISION EST-IL POSSIBLE D'ATTEINDRE DANS UN OBSERVATOIRE MAGNÉTIQUE DE PREMIÈRE CLASSE COMPRENANT UN PERSONNEL COMPLET?

C. Sucksdorff et M. Kuwashima

Résumé

L'expérience, notamment celle acquise à l'observatoire de géophysique de Nurmijarvi et aussi dans d'autres observatoires scandinaves, montre que dans un observatoire magnétique comprenant un personnel complet, on peut obtenir une précision de 1 nT dans la mesure de toutes les composantes du champ magnétique. Pour ce faire, des mesures absolues prises une fois la semaine au moyen d'instruments ordinaires suffisent, tandis que l'enregistrement et le traitement des données ne nécessitent que du matériel à prix moyen et les services d'une seule personne. Avec du matériel très perfectionné et des systèmes de contrôle très sensibles, on peut obtenir une précision très supérieure, comme en fait foi l'exemple de l'observatoire magnétique de Kakioka. Dans ce cas, la valeur absolue du rapport gyromagnétique des protons est le facteur limitatif de la précision absolue des données mesurées et enregistrées.

Introduction

La recherche sur le mécanisme ainsi que les causes du champ géomagnétique et de ses variations s'appuient sur des enregistrements des composantes du champ réalisés dans des observatoires magnétiques dont le nombre dépasse les 200 actuellement, sur des mesures prises dans des stations de répétition et sur des levés magnétiques. La précision finale des levés et des mesures dans les stations de répétition dépend de la précision des valeurs obtenues dans les observatoires, parce que ces dernières sont utilisées dans la réduction et l'étalonnage des autres mesures. Le but est d'obtenir la plus grande précision possible pour toutes les mesures géomagnétiques, car les variations d'une année à l'autre sont faibles, habituellement de quelques dixièmes de nanoteslas par année, et les phénomènes à étudier, par exemple les « sautillements » et les « pulsations » dans la variation séculaire et les effets du cycle des taches solaires sur les courants induits à l'intérieur de la terre, ont des amplitudes qui sont en général du même ordre de grandeur ou plus faibles. Ceci montre qu'une précision absolue de l'ordre de 1 nT ou moins s'impose pour les travaux menés dans les observatoires géomagnétiques. Dans la présente communication, nous montrerons qu'une précision de 1 nT peut être obtenue assez facilement, dans un observatoire comprenant un personnel complet, au moyen d'instruments classiques qui ne sont pas très coûteux. L'observatoire de Nurmijarvi en Finlande a été choisi comme exemple d'une telle station. L'observatoire de Kakioka est un exemple d'une installation moderne où la précision des observations est la plus élevée dans le monde.

L'observatoire de Nurmijarvi

Instrumentation

L'observatoire géophysique de Nurmijarvi (lat. 60°30,5'N, long. 24°39,3'E) peut être qualifié d'entièrement habité malgré le fait que le personnel ne compte que quatre personnes. L'exploitation de la station magnétique nécessite en moyenne les services d'une personne à temps plein. Habituellement, deux ou trois personnes y travaillent pendant les jours de semaine, et seulement une personne à temps partiel, les fins de semaine. En plus d'exploiter la station magnétique, on effectue à l'observatoire plusieurs autres enregistrements de données sismiques, ionosphériques ou météorologiques, ce qui complète l'emploi du temps du personnel. Trois des employés logent dans la région de l'observatoire de sorte qu'en cas de besoin, ils peuvent veiller à l'entretien des instruments, même en dehors des heures de travail.

Les instruments absolus de l'observatoire sont:

— des magnétomètres à protons (2 Elsec, 1 PPM Polish)
— une horloge à cristal (Rohde et Schwarz) qui est utilisée notamment pour contrôler les cristaux des magnétomètres à protons
— une bobine horizontale de Helmholtz (82 cm de diamètre) installée sur un Reisethéodolite Askania pour les mesures de magnétomètre à protons vectoriel de H et Z (méthode de Serson d'addition et de soustraction approximativement au double de H)
— un théodolite Zeiss 010A (précision 1") avec vanne de flux Geoinstruments Ky pour la mesure de D et de I
— quatre déclinomètres classiques qui ne sont plus utilisés, notamment parce que le théodolite à vanne de flux semble mesurer plus facilement le paramètre D avec la précision requise de 0,1'
— cinq QHM qui servent surtout à comparer les mesures de différents observatoires et à effectuer les mesures de champ.

Pour enregistrer le champ en continu, on dispose, dans la salle d'enregistrement, où la température est maintenue constante à 0,2°C près:

— d'un ensemble de variomètres de La Cour qui permettent l'enregistrement photographique des composantes X, Y et Z avec des sensibilités de 8,05, 3,95 et 7,82 nT/mm respectivement (matériel d'enregistrement normal installé à l'origine en 1952)
— de deux ensembles de magnétomètres photoélectriques à torsion (MPT), décrits ailleurs dans la présente publication en rapport avec la comparaison des magnétomètres d'enregistrement utilisés à Ottawa en 1986, lesquels produisent des moyennes d'une minute (60 échantillons par minute) et des valeurs instantanées à chaque minute juste. Un des instruments sert aux mesures courantes, et présente une sensibilité quelque peu supérieure et une plage dynamique réduite; l'autre a une plage dynamique de +6000 nT, et peut ainsi enregistrer de plus fortes perturbations magnétiques. Le deuxième MPT assure aussi la relève du premier. Les deux instruments ont une mémoire capable de stocker environ une semaine de valeurs moyennes et instan-

tanées d'une minute. Un micro-ordinateur Data General DG 1 effectue la lecture des données en mémoire et les enregistre sur disquettes en unités finales de 0,1 nT. Le micro-ordinateur produit aussi les moyennes horaires, le temps des mesures absolues, etc., et imprime les données requises. Il sert aussi à modifier les valeurs de la ligne de base ou les sensibilités au besoin. Le traitement final des données est effectué au bureau principal d'Helsinki sur l'ordinateur de l'Institut finlandais de météorologie qui prépare également les bandes magnétiques standard suivant la présentation de l'AIGA, destinées aux WDC.

La précision des mesures absolues

L'exactitude des données produites dans un observatoire dépend de la précision des mesures absolues. La précision absolue des mesures dites « absolues » dépend à son tour de la précision des unités physiques fondamentales utilisées et de la précision de leur mesure par rapport aux « mesures absolues » magnétiques.

L'intensité totale F est mesurée au moyen de magnétomètres à protons. Ici, le paramètre fondamental est le rapport gyromagnétique du proton (μ), fixé par l'AIGA en 1960 à $2{,}67513 \times 10^8$ radians/tesla s, ou 0,0425760 Hz/nT, ou 23,4874 nT/Hz. Selon les plus récentes mesures absolues de cette valeur, μ comporte une erreur inférieure à 10^{-4} nT/Hz, ce qui signifie que μ est connu avec une précision suffisante pour mesurer F avec une précision de 0,2 nT. La fréquence du cristal du magnétomètre à protons, qui est habituellement de l'ordre de 10^5 Hz, doit être connue avec autant de précision, ce qui est facile à vérifier en introduisant un signal, par exemple de 2 kHz, provenant d'une bonne horloge à cristal, dans la prise du capteur du magnétomètre.

À Nurmijarvi, les magnétomètres à proton Elsec ont une résolution de 0,25 nT, et le PPM, une résolution de 0,1 nT, de sorte que F est connu avec une précision de plus de 0,5 nT. Dans les études de comparaison des instruments magnétiques qui ont lieu chaque année dans l'un des pays scandinaves, les magnétomètres à protons sont aussi comparés, et une fois les erreurs corrigées, on constate que les variations possibles de la fréquence du cristal sont faibles, c'est-à-dire de l'ordre de 0,25 nT. Les composantes de F sont mesurées suivant deux méthodes différentes: la mesure par magnétomètre à protons vectoriel et la vanne de flux DI.

Comme Wienert l'indique notamment dans son livre sur la pratique des observatoires (Wienert 1970), le point critique dans la mesure par magnétomètre à protons vectoriel est la verticalité de l'axe vertical. À Nurmijarvi, la bobine horizontale est munie d'un niveau qui a une sensibilité de 4″ par division. Le niveau ainsi que le courant de la bobine sont maintenus à une valeur aussi constante que possible. Les petites variations que peut produire le déplacement de la bobine sont pris en compte dans les calculs, comme il en est fait mention dans les annuaires de Nurmijarvi (Kivinen 1986). La fréquence du cristal est contrôlée avant et après chaque mesure. La méthode du magnétomètre à protons vectoriel est utilisée à Nurmijarvi depuis 1969.

Tableau 6.1. Écarts-types des mesures absolues à l'observatoire de Nurmijarvi, 1981-1985

		1981	1982	1983	1984	1985
X	nT	0.62	0.58	0.57	0.70	0.58
Y	nT	0.54	0.85	0.66	0.31	0.35
Z	nT	0.57	0.52	0.40	0.64	0.53

Nous concluons donc que la précision absolue des mesures « absolues » à l'observatoire de Nurmijarvi est supérieure à 1 nT pour chacune des trois composantes.

La vanne de flux DI est utilisée depuis 1984. La mesure demande plus de dextérité que la méthode précédente mais, lorsqu'effectuée par un observateur expérimenté, elle permet d'obtenir assez facilement des précisions de 6″ pour D et de 3″ pour I. Cela signifie qu'à Nurmijarvi, dans un champ de 15 000 nT en X, de 1200 nT en Y et de 49 000 nT en Z, on obtient des erreurs inférieures à 1 nT, 0,5 nT et 0,5 nT respectivement. Ces précisions ont été confirmées de plusieurs façons. Comme il a déjà été mentionné, les étalons des pays scandinaves ont été comparés une fois par année pendant de nombreuses années, et les écarts entre les étalons des différents observatoires se sont avérés inférieurs à 1 nanotesla. Une autre vérification consiste à utiliser plusieurs méthodes indépendantes pour déterminer les différentes composantes: par exemple, la composante D posait beaucoup de problèmes jusqu'à l'avènement de la vanne de flux DI. Entre temps, elle a été mesurée au moyen de quatre déclinomètres différents, dont le déclinomètre de précision Askania qui s'appuie sur une autre méthode. Enfin, la dispersion des résultats des mesures absolues donne une indication de la précision (pas nécessairement la précision absolue) des mesures. Les écarts-types des observations absolues pour les années 1981 à 1985 sont donnés dans le tableau 6.1.

La précision des données enregistrées

Avant 1983, date où les données ont commencé à être enregistrées numériquement en direct et le sont encore aujourd'hui, l'observatoire de Nurmijarvi ne produisait que des moyennes horaires qui étaient mises à l'échelle à la main et vérifiées à partir des magnétogrammes courants de La Cour. On peut supposer ici que la précision des valeurs de la ligne de base est la même que celle des mesures absolues, c'est-à-dire environ 1 nT, parce que la dispersion des valeurs calculées de la ligne de base dépassait très rarement 0,5 nT. Pour la remise à l'échelle, on acceptait en général des écarts de 0,2 mm dans les moyennes horaires. Cela signifie que la précision absolue des moyennes horaires était de 2 nT environ, sauf pendant les périodes de perturbation pour lesquelles la précision était quelque peu inférieure. Au début des enregistrements numériques, on comparait les valeurs recueillies à la main avec celles produites numériquement, et on acceptait les mêmes écarts qu'auparavant. La précision finale des moyennes horaires a probablement été améliorée et dépasse 2 nT, même pour les périodes de perturbation, à cause de la grande stabilité des valeurs de la ligne de base du MPT et de la capacité de l'instrument à fonctionner pendant les périodes de perturbation. Aujourd'hui, 2 MPT à enregistrement numérique

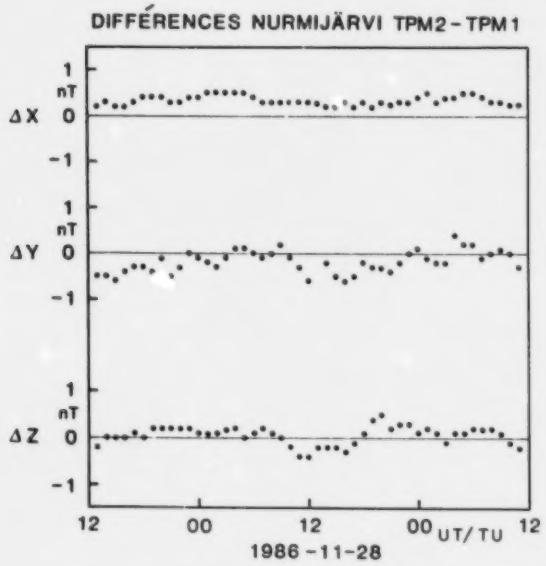


Figure 6.1 Différence de la moyenne des mesures à chaque heure pour X,Y et Z avec les deux magnétomètres photoélectriques à torsion (TPM) de Nurmijarvi.

se contrôlent mutuellement et les magnétogrammes de La Cour ne servent qu'à des fins de vérification pendant les périodes d'accalmie ou lorsqu'on s'attend à des pointes dans les enregistrements numériques.

Selon les mesures absolues des valeurs de la ligne de base des MPT, la variation de ces dernières s'est maintenue autour de 2 à 3 nT par année. Cela nous permet de conclure que la précision des valeurs produites numériquement à chaque minute, ainsi que celle des valeurs horaires quotidiennes et annuelles moyennes est d'environ 1 nT.

La figure 6.1 représente une comparaison typique des données produites par les deux MPT dans la salle des variations de l'observatoire de Nurmijarvi. Nous pouvons constater que les différences sont faibles, atteignant très rarement 1 nT, et que les valeurs moyennes sont généralement les mêmes dans les deux enregistrements.

Dans les MPT, la boucle de contre-réaction d'un facteur de 2000 maintient les aimants dans des positions pratiquement invariables. Par conséquent, si les aimants des différentes composantes ont été orientés correctement suivant les directions orthogonales X, Y et Z, aucune correction n'est nécessaire entre les composantes. L'observatoire de Nurmijarvi est doté d'une salle de bobines, où trois bobines orthogonales (précision de 1′ ou mieux) entretiennent un champ homogène (à 10^{-5} près) de 30 cm de diamètre qui sert à contrôler l'orientation des capteurs magnétométriques et aussi à déterminer la graduation des échelles avec une grande précision. Les capteurs peuvent être orientés avec une précision de 4′ pour ne pas produire un effet de plus 1 nT lorsqu'une autre composante subit une variation de 1000 nT.

Nous avons essayé de montrer ci-dessus qu'il est possible d'exploiter une station d'enregistrement magnétique à un coût raisonnable, tout en obtenant une précision suffisamment grande pour répondre à la plupart des besoins dans le domaine du géomagnétisme. Il est important que l'observatoire soit visité fréquemment. Néanmoins, comme l'exploitation de la station magnétique nécessite les services de moins d'une personne à temps plein en moyenne et qu'une station entièrement habitée suppose un personnel d'au moins 4 employés, il n'est que raisonnable de mener plusieurs programmes dans le même observatoire. À l'observatoire de Nurmijarvi, environ 20 programmes d'enregistrement ou d'observation différents sont menés de front pour différents instituts. Il est donc important que l'observatoire emploie au moins une personne qui a de l'expérience dans les mesures magnétiques absolues. Il est aussi important pour maintenir la qualité des données produites, qu'il y ait au moins une personne à l'observatoire ou à proximité de celui-ci utilisant continuellement des données, par le fait même, se souciant ainsi de leur qualité.

L'observatoire magnétique de Kakioka

Le Service japonais des observatoires magnétiques relève de l'Agence japonaise de météorologie (AJM). L'AJM emploie environ 5000 personnes, tandis que le Service japonais des observatoires magnétiques a des effectifs d'environ 50 personnes et comporte 7 observatoires magnétiques. L'observatoire magnétique de Kakioka (lat. 36°13′45″ N, long. 140°11′23″E) est l'observatoire étalon du Japon où on utilise le système KASMMER (Kakioka Automatic Standard Magnetometer) depuis 1972. Le personnel de soutien du système KASMMER se compose de huit employés. L'observatoire magnétique de Memambetsu (lat. 43°54′30″N, long. 144°11′35″E) et l'observatoire magnétique de Kanoya (lat. 31°25′14″N, long. 130°52′56″E) sont les observatoires du service de Kakioka et sont classés observatoires de première classe. Le travail de ces laboratoires consiste à effectuer des observations absolues et des observations de variations semblables à celles effectuées à Nurmijarvi. Memambetsu et Kanoya emploient quatre personnes.

L'observatoire magnétique de Kakioka comprend aussi quatre stations rarement visitées qui sont: Iwaki (IWK), Matsuzaki (MTZ), Omaezaki (OMZ) et Chichijima (CBI). Ces observatoires logent un magnétomètre à protons pour l'observation du champ total (F) et un magnétomètre à vanne de flux pour l'observation des variations (H, D, Z). Les données magnétiques sont mesurées à chaque minute, puis stockées dans une mémoire accessible par un ordinateur (par exemple une mémoire PROM). Les observations absolues sont effectuées à tous les deux ou trois mois.

Description de KASMMER

Le système KASMMER comprend quatre parties: quatre magnétomètres à pompage optique pour l'observation des composantes H, Z, D et F, un magnétomètre à vanne de flux servant d'appui à des magnétomètres à pompage optique, un système d'étalonnage des magnétomètres à pompage optique et un système informatique. La principale caractéristique du système KASMMER est qu'il peut mesurer les valeurs absolues des différentes composantes du champ géomagnétique à chaque seconde.

Quatre magnétomètres à pompage optique mesurent les intensités horizontale (H) et verticale (Z) du champ magnétique, l'azimut de la déclinaison(D) et l'intensité totale du champ (F). Les magnétomètres à pompage optique effectuent des mesures à chaque seconde avec une résolution de 0,1 nT; l'élément détecteur est un oscillateur au césium qui produit un signal de sortie dont la fréquence est proportionnelle à l'intensité du champ magnétique ambiant. Le capteur au césium est situé au centre de la paire de bobines de Helmholtz qui produit un champ de polarisation approprié pour la mesure des composantes magnétiques H, D et Z.

Comme il en sera question ci-dessous, la stabilité du magnétomètre à pompage optique dépend en dernier ressort des variations indésirables de l'inclinaison de la bobine de polarisation de Helmholtz. Les bobines de Helmholtz sont montées sur un support de granite de section octogonale de 60 cm de diamètre. La hauteur du support est de 2,8 m dont près de la moitié est enfouie dans le sol. La base du support repose sur une assise octagonale en béton amagnétique renforcé de tiges de laiton.

Dans l'observation de la composante D, le capteur du magnétomètre à pompage optique détecte la composante H_y. La direction de H_y fait un angle de 60° vers l'est par rapport au méridien magnétique moyen. Les composantes perpendiculaires, H_x dans le plan horizontal et Z dans le plan vertical, sont éliminées par les deux bobines orthogonales de Helmholtz. La composante D est calculée suivant la relation

$$D = \cos^{-1}(H_y/H) - \Theta$$

où Θ est égal à environ 60°.

Chaque bobine de Helmholtz comporte deux enroulements séparés, un enroulement principal et un enroulement auxiliaire, dont les diamètres sont de 600 mm et 500 mm respectivement. L'enroulement principal produit un champ constant fixé lors du réglage initial, tandis que l'enroulement auxiliaire annule la variation dans le temps du champ naturel en utilisant la contre-réaction. La fluctuation du courant de polarisation qui traverse la bobine de Helmholtz est limitée à moins de 1×10^{-6} A dans la plage de température ambiante de 15 à 30°C.

Un magnétomètre à vanne de flux très fiable a été installé en 1983 afin de servir d'appui au magnétomètre à pompage optique. Le coefficient de dérive dû à la température du magnétomètre est inférieur à 0,1 nT/°C.

Le système d'étalonnage du magnétomètre à pompage optique est le système d'observation absolue en usage dans les observatoires magnétiques. Le système d'étalonnage consiste en un théodolite magnétique pour l'observation de la déclinaison (D) et de l'inclinaison (I), et d'un magnétomètre à protons pour l'observation de l'intensité du champ total (F). Le théodolite magnétique est appelé DI-72 parce qu'il mesure D et I et a été installé en 1972. Le magnétomètre à protons est appelé MO-PK (Observation magnétique par magnétomètre à Protons à Kakioka). Le DI-72 mesure D et I avec une précision d'une seconde. Les pièces principales sont une bobine de Helmholtz montée sur le théodolite et un jeu de bobines tournant placé au centre du théodolite. La bobine de Helmholtz produit un champ magnétique Fc dont l'intensité est voisine de l'intensité du champ géomagnétique ambiant F, qui est la quantité à mesurer. La direction de Fc est voisine de celle de F au début de l'observation. L'observateur modifie successivement la direction de Fc jusqu'à ce qu'elle soit opposée à celle de F. L'observateur essaie donc d'aligner le vecteur Fc parallèlement à F afin de minimiser un vecteur dF défini par

$$dF = Fc + F.$$

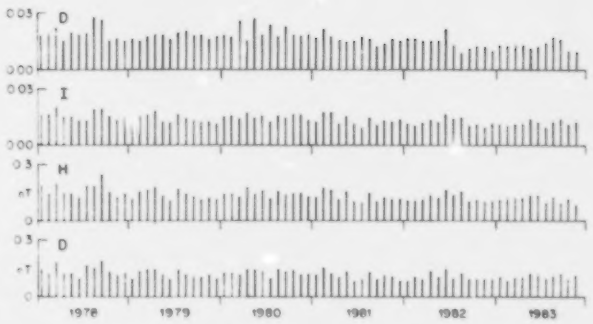


Figure 6.2 Déviations standards des mesures absolues de l'observatoire magnétique de Kakioka.

Par cette méthode de zéro, la déclinaison (D) et l'inclinaison (I) sont assimilées aux directions de la bobine de Helmholtz. Le signal c.a. de dF est amplifié par un amplificateur à faible bruit, puis affiché sur un synchroscope. L'observateur règle la direction de la bobine de Helmholtz au moyen de deux vis tangentielles, tout en examinant les figures affichées au synchroscope.

L'exactitude du système KASMMER dépend de la précision de l'étalonnage et des observations absolues. La figure 6.2 montre les résultats des observations absolues effectuées au moyen du système KASMMER (DI-72 et MO-PK). Les résultats des observations absolues sont présentés en termes de l'écart-type pour la période de 1978 à 1983. Comme le montre la figure, l'écart-type a été limité à moins de 0,02′ pour D et I, et à moins 0,2 nT, pour H et Z. Au cours de la période de 1981-1982, KASMMER a été réaménagé en partie. Comme le montre la figure 6.2, l'écart-type a été réduit, à environ 0,015′ pour D et I, et à environ 0,1 nT pour H et Z respectivement. Le niveau de confiance attendu à 95 % est de 0,0146′ et de 0,118′ pour les composantes D et I, et de 0,117 nT et de 0,102 nT pour les composantes H et Z, respectivement.

Système d'acquisition des données

Le système d'acquisition des données de KASMMER consiste en deux mini-ordinateurs, un pour le traitement en direct et l'autre pour le traitement en différé. Les ordinateurs sont des systèmes E-600 fabriqués par Hitachi Manufactory, Japon. L'ordinateur en direct a une mémoire de 128 kilomots avec un système de disque de 19 mégamots; l'ordinateur en différé a une mémoire de 256 K avec un système de disque de 38 mégamots. Les routines courantes de traitement en temps réel par ordinateur en direct comprennent l'acquisition en continu des données du magnétomètre à pompage optique à chaque seconde et des données des magnétomètres à vanne de flux et à protons d'appoint à chaque minute. L'ordinateur en direct effectue aussi la

confirmation de la qualité des données. Il peut mettre en mémoire les données d'une seconde pendant une période de 8 jours et les données d'une minute pendant une période atteignant 45 jours. De plus, une valeur d'une minute est calculée à 01 min à partir des 60 valeurs enregistrées à chaque seconde entre 00 min 30 s et 01 min 29 s. Des valeurs d'une minute provenant du magnétomètre à vanne de flux (VH, VZ, VD) sont aussi calculées suivant une méthode semblable. Des valeurs instantanées d'une minute provenant du magnétomètre à protons, FP, sont obtenues à chaque minute.

La qualité des données d'une minute est confirmée très soigneusement. Un contrôle trigonométrique est d'abord effectué au moyen des données FO, H et Z du magnétomètre à pompage optique, suivant la relation $A = FO - (H^2 + Z^2)^{1/2}$. Si une des valeurs calculées A dépasse une limite donnée (habituellement 0,2 nT), les données sont marquées d'un symbole spécial. Toute valeur incorrecte devrait être remplacée après un examen détaillé. Après le contrôle trigonométrique, on effectue un contrôle des variations par estimation au jugé du taux apparent de variation d'un point d'observation au suivant. Si une variation dépasse une limite donnée (habituellement 5 nT), ce point d'observation est marqué d'un symbole spécial, et la valeur est remplacée le cas échéant après un examen détaillé. Enfin, un contrôle comparatif est effectué par comparaison entre les données du magnétomètre à pompage optique, celles du magnétomètre à vanne de flux et celles du magnétomètre à protons. Si un des écarts entre 2 séries de données dépasse la limite fixée (habituellement 0,2 nT), le point d'observation est à son tour marqué d'un symbole, et sa valeur, remplacée le cas échéant après un examen détaillé. Après ces contrôles, les données d'une minute sont compilées sur bande magnétique avec les données du magnétomètre à pompage optique.

L'ordinateur en différé est utilisé parfois lorsque l'ordinateur en direct est en panne, et il est aussi utilisé pour les travaux spéciaux et les travaux de recherche.

L'étalonnage des données du magnétomètre à pompage optique est effectué à partir des résultats des observations absolues qui sont effectuées une ou deux fois par semaine. Les données d'étalonnage pour le magnétomètre à pompage optique sont définies comme suit:

CF = FO (optique) − FP (absolu)
CH = H (optique) − H (absolu)
CZ = Z (optique) − Z (absolu)
CD = D (optique) − D (absolu)

Une fois corrigées à l'aide de valeurs d'étalonnage CF, CH, CZ et CD, les données d'une minute du magnétomètre à pompage optique deviennent les données KASMMER. Par conséquent, la stabilité des données KASMMER dépend de la stabilité des valeurs d'étalonnage CF, CH, CZ et CD.

La figure 6.3 donne les moyennes mensuelles de CF, CH, CZ et CD pour la période 1976-1985. Comme le montre la figure, la variation de CF est inférieure à 1,0 nT pour la période de 10 ans. D'après les résultats obtenus pour l'écart-type, la stabilité attendue de CF est de 0,045 nT.

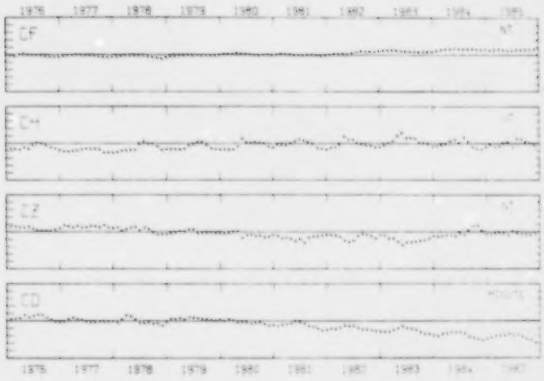


Figure 6.3 Valeurs de calibration pour le système KASMMER de l'observatoire magnétique de Kakioka.

Tableau 6.2 Exactitude du système de KASMMER (écart-type)

	F	H	Z	D	I	Hy
	nT	nT	nT	′	′	nT
Valeurs-C	0.045	0.215	0.165	0.0275	0.0195	0.245
Absolues	0.059	0.117	0.102	0.0147	0.0118	—
Valeurs						

Les variances de CH et de CZ sont légèrement supérieures à celles de CF, à cause du changement d'orientation de la bobine de polarisation de Helmholtz qui additionne le champ de polarisation de compensation pour mesurer une composante spécifique du champ magnétique. La variation annuelle de CH et de CZ indiquée dans la figure 6.3 est attribuée à la variation annuelle de l'inclinaison de la bobine de Helmholtz.

Les distributions des erreurs de CH, CZ, CD et CI révèlent que 95 % des valeurs mesurées de la composante H s'écartent de moins de 0,215 nT par rapport à la moyenne; la valeur correspondante est de 0,165 nT pour la composante Z, 0,0275′ pour la composante D, et 0,0245′ pour la composante I.

En conclusion, nous avons confirmé que le système KASMMER constitue un observatoire magnétique valable comme l'indique, en bref, le tableau 6.2.

Les données d'une minute de KASMMER sont acheminées au WDDC depuis 1976 suivant un format de l'AIGA, sur bande magnétique de 1600 bits/po. Les données KASMMER ont aussi été beaucoup utilisées à diverses fins, notamment pour la prévision des séismes, l'activité volcanique et les conditions de propagation des ondes radios.

Référence

Weinert, K.A.
1970: Notes on geomagnetic observatory and survey practice; UNESCO, Paris, 217 p.

MESURES ABSOLUES DU CHAMP MAGNÉTIQUE TERRESTRE DANS LES OBSERVATOIRES FRANÇAIS: RÉSULTATS OBTENUS AVEC LE MAGNÉTOMÈTRE THÉODOLITE PORTABLE À VANNE DE FLUX POUR LA PÉRIODE 1979-1986

D. Gilbert[1]
J.M. Cantin[2], J. Bitterly[2], R. Schlich[2] et J. Folques[2]

Résumé

Un magnétomètre théodolite portable permettant la mesure des éléments du champ magnétique terrestre a été réalisé à l'aide d'une sonde à vanne de flux montée sur la lunette d'un théodolite « seconde » amagnétique. L'électronique de mesure, de conception originale permet de réaliser des mesures directionnelles en association avec un magnétomètre à protons. Les valeurs obtenues pour la déclinaison et l'inclinaison (méthode de champ nul) correspondent à des mesures absolues, la précision est meilleure que 5 secondes d'arc. La mesure directe en nanotesla d'une composante quelconque du champ magnétique terrestre (méthode de compensation) intègre une procédure de calibration simple et précise de l'appareil par référence à un magnétomètre à protons, il s'agit d'une détermination pseudo absolue. Ces mesures d'intensité dans une direction donnée sont particulièrement appréciée dans les observatoires polaires où la détermination de faibles champs horizontaux avec les QHM apparait souvent délicate. La précision obtenue pour les mesures d'intensité reste de l'ordre du nanotesla. Ces performances annoncées sont confirmées par les résultats obtenus en observatoire. Le magnétomètre théodolite portable à vanne de flux est proposé comme appareil de référence pour les observatoires magnétiques; il est également bien adapté à tous les levés magnétiques en campagne.

Introduction

Les éléments du champ magnétique terrestre (intensité et composantes vectorielles) sont mesurés systématiquement dans tous les observatoires magnétiques. Le calcul du champ moyen, la détermination de la variation séculaire, l'établissement des cartes magnétiques reposent pour une large part sur ces déterminations.

Récemment encore, les appareils les plus couramment employés pour la mesure des éléments du champ magnétique utilisaient un équipment mobile constitué par un aimant suspendu(QHM, BMZ, balance de torsion). Ces appareils délicats à manipuler, nécessitent des réétalonnages assez fréquents. Les appareils du type inclinomètre à induction comme l'inclinomètre de cambridge, l'inclinomètre DI 72 de l'observatoire de KAKIOKA (Yanagihara et al., 1973) ou l'appareillage proposé par Usher et Reid (1978) fournissent une valeur absolue de l'inclinaison mais demeurent d'un emploi délicat en observatoire et ne sont pas adaptés aux mesures de terrain dans la plupart des cas. L'emploi de magnétomètres à protons ou à pompage optique pour la détermination des composantes vectorielles mettent en oeuvre des montages complexes, souvent encombrants (bobines) et peu compatibles avec les besoins de mesures en campagne.

L'idée d'utiliser, pour la mesure de la déclinaison et de l'inclinaison, un appareil unique, réalisé à l'aide d'une sonde à vanne de flux fonctionnant en détecteur de zéro et fixée sur un théodolite amagnétique, à été suggérée et essayée par Tenani (1941). Différents montages de ce type ont été proposés par la suite en particulier par Meyer et Voppel (1954), Serson et Hannaford (1956), Trigg (1970). Bien qu'attrayante cette méthode ne s'est pas réellement généralisée essentiellement en raison des erreurs introduites par les défauts inhérents aux capteurs à vanne de flux et de la résolution insuffisante des théodolites amagnétiques disponibles sur le marché. Les progrès enregistrés à partir de 1960 en ce qui concerne les performances des magnétomètres à vanne de flux et la possibilité de rendre suffisamment amagnétiques des théodolites « seconde » récemment commercialisés nous ont conduit à étudier en 1976 un montage de ce type. Les principaux critères pris en compte dans cette étude ont été les suivants:

— résolution et précision meilleures que 3 secondes d'angle pour les mesures de la déclinaison et de l'inclinaison;
— réalisation d'une électronique stable, fiable et de faible consommation;
— bruit de l'ensemble sonde-électronique inférieur à 0,2 nT pointe à pointe;
— méthodologie de mesure permettant d'éliminer l'influence des erreurs instrumentales;
— simplicité de mise en oeuvre sur le terrain;
— possibilité complémentaire de mesurer l'intensité du champ magnétique dans une direction donnée.

Les cinq premiers exemplaires de ce nouveau magnétomètre théodolite portable ont été construits et testés entre 1977 et 1980 à l'Institut de Physique du Globe de Paris (Cantin et al., 1979). Le premier appareil construit a été utilisé régulièrement à l'observatoire de Chambon-la-Forêt à partir de 1980. Les quatre exemplaires suivants ont été installés en janvier 1981 aux observatoires de Port Alfred (archipel des Crozet), Port-aux-Français (Kerguelen), Martin de Viviès (île Amsterdam) et Dumont d'Urville (Terre Adélie) situés dans les Terres Australes et Antarctiques Françaises. La construction et la commercialisation de ce magnétomètre sont assurées depuis 1981 par l'Institut de Physique du Globe de Strasbourg (14 exemplaires en service en 1986).

Des montages de ce type ont été développés par d'autre équipes: Fisher et al.(1979), Lauridsen (1985) ainsi que Rietman du Royal Netherlands Météorological Institute. À

1. Institut de Physique du Globe, Paris, France.

2. Institut de Physique du Globe, Strasbourg, France.

présent trois sociétés d'instrumentation proposent des appareils pour la mesure de la déclinaison et de l'inclinaison; il s'agit du « DIM 100 Declination and Inclination Magnetometer » construit par EDA Instruments Inc. et du « Portable Fluxgate Declinometer and Inclinometer » type 810 construit par Littlemore Scientific Engineering Company et du « MAG-01 » construit par Bartington Instruments Ltd. Progressivement les magnétomètres théodolites à vanne de flux remplacent les instruments traditionnels et sont adoptés comme appareils de référence absolue.

Description de l'appareillage

Théodolite amagnétique.

La précision des mesures de déclinaison (D) et d'inclinaison (I) dépend directement de la résolution du théodolite. Il faut rappeler que la détermination des composantes H et Z du champ magnétique avec une précision de ± 1 nT nécessite de connaître la valeur de I avec une précision de 3 secondes d'angle, si l'on suppose par ailleurs que le champ total F est connu à $\pm 0{,}5$ nT; le choix d'un théodolite « seconde » s'impose pour obtenir la précision souhaitée. Le théodolite modèle 010A construit depuis 1971 par Carl Zeiss Jena possédait les caractéristiques optiques requises: précision moyenne ± 1 seconde, compensateur d'inclinaison fonctionnant sur le principe du pendule suspendu et donnant une précision de calage de 0,3 secondes. Cependant ce modèle n'était pas entièrement amagnétique; aussi avons-nous procédé en 1976, en collaboration avec le représentant ZEISS JENA en France, au remplacement des pièces et sous-ensembles mécaniques du théodolite 010A de série. Pour notre application il est nécessaire que le champ pertubateur résultant d'une magnétisation résiduelle permanente ou d'un effet d'aimantation induite par le champ ambiant soit inférieur à 0,2 nT au niveau de la sonde fixée sur la lunette du théodolite. Les pièces mécaniques remplacées sur le théodolite 010A de série ont été usinées en ARCAP, alliage non-magnétique (susceptibilité volumique inférieure à 8.10^{-4} SI) fourni par le département Métaux spéciaux du Comptoir Lyon Alemand Louyot. Pour le premier théodolite ainsi modifié on a effectué des tests d'amagnétisme sur l'ensemble des pièces avant montage. À présent Zeiss Jena fournit directement le théodolite 010B en version amagnétique (revue d'Iéna, 1981/2 page 69). Un dispositif d'éclairage amagnétique peut s'adapter au théodolite pour la lecture des cercles gradués.

Sonde à vanne de flux et électronique de mesure

En 1976 nous avons confié à la société THOMSON-CSF D.A.S.M. l'étude d'une sonde à vanne de flux destinée à être montée sur la lunette du théodolite prototype 010A. La sonde réalisée est du type « parallèle » à deux noyaux saturés. Les caractéristiques de construction résultent d'un compromis entre la nécéssité d'avoir une sonde de dimensions réduites (facilité d'adaptation et possibilité de mouvement pour les retournements en cours de mesure) et de conserver une résolution suffisante pour l'emploi de cette sonde en détecteur de zéro. La sonde doit en outre posséder une bonne stabilité mécanique (absence de déformation en cours de mesure). Le quartz a été retenu pour réaliser le

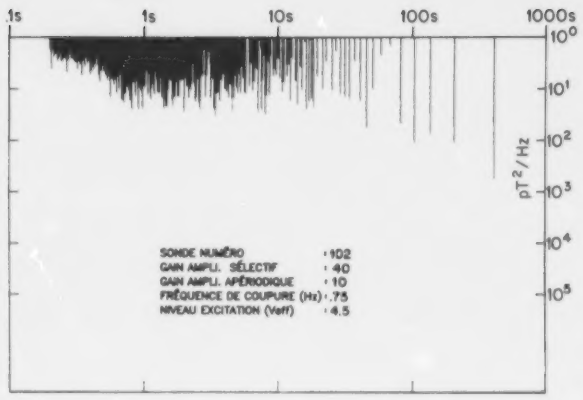


Figure 6.4 Densité spectrale du bruit du magnétomètre portatif à théodolite IPGS.

mandrin servant de support aux deux noyaux perméables et aux bobinages. Les dimensions extérieures de la sonde sont de 80 mm pour la longueur et de 18 mm pour le diamètre.

Les sondes construites de 1976 à 1986 utilisent des noyaux perméables en mumétal; depuis 1986 Thomson-CSF livre des sondes dont les noyaux sont en matériaux amorphes. La densité spectrale de bruit de ces nouvelles sondes est donnée figure global du magnétomètre est de 400 pT^2/Hz à 100 s et de 80 pT^2 Hz à 10 s. La limite de résolution de l'appareillage est donc comprise entre 0,1 et 0,2, valeur tout à fait compatible avec la résolution des meilleurs variomètres d'observatoire. La sonde est fixée sur la lunette du théodolite par l'intermédiaire d'un support en oxyde de polyphénylène (NORYL, à 30 % de fibres de verre). Un capot recouvre la sonde et assure une protection mécanique et thermique suffisante lors des manipulations.

L'électronique de mesure, étudiée et réalisée par Cantin (1980) est placée dans un coffret de transport qui comporte:

— un circuit « magnétomètre » constitué de l'oscillateur d'excitation, de l'amplificateur sélectif, du démodulateur synchrone et de l'amplificateur d'asservissement. Ce dernier est associé à un circuit anti-saturation qui fournit le courant de contre-réaction nécessaire au maintien permanent de la sonde en champ quasi nul pour les valeurs du champ magnétique ambiant comprises entre 100 et 100 000 nT;
— un circuit générateur de courant de compensation ultralinéaire utilisé pour les mesures directe des composantes;
— un voltmètre numérique permettant l'affichage en 1/10 de nT des variations de champ mesurées suivant l'axe de la sonde;
— une batterie au plomb étanche de 12V/4Ah assurant une autonomie de fonctionnement supérieure à 10 heures.

Le schéma de principe de l'électronique de mesure est représenté sur la figure 6.5. Le coffret électronique doit être placé à au moins 1,5 m du théodolite pour ne pas perturber les mesures. L'opérateur utilise commodément un boitier répétiteur de petites dimensions qui permet de lire directement la valeur du signal de sonde et l'heure de

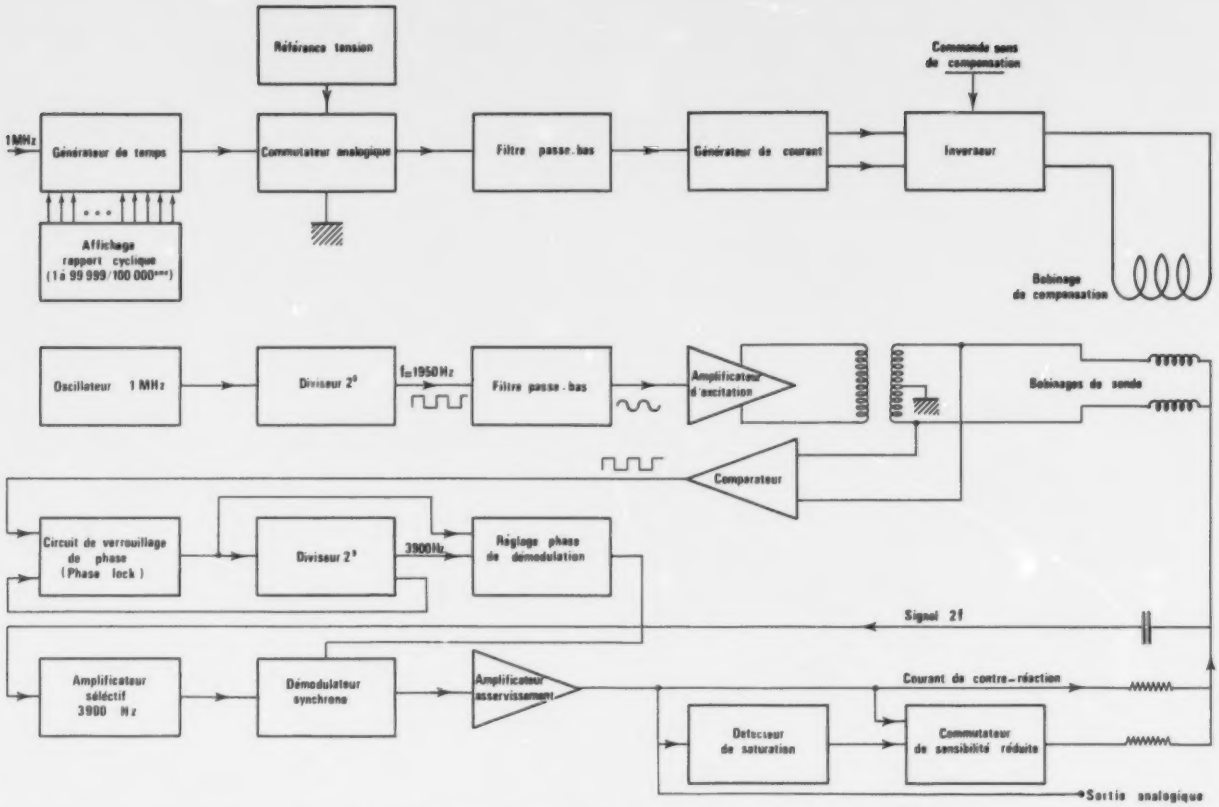


Figure 6.5 Schéma blocs de magnétomètre portatif à théodolite.

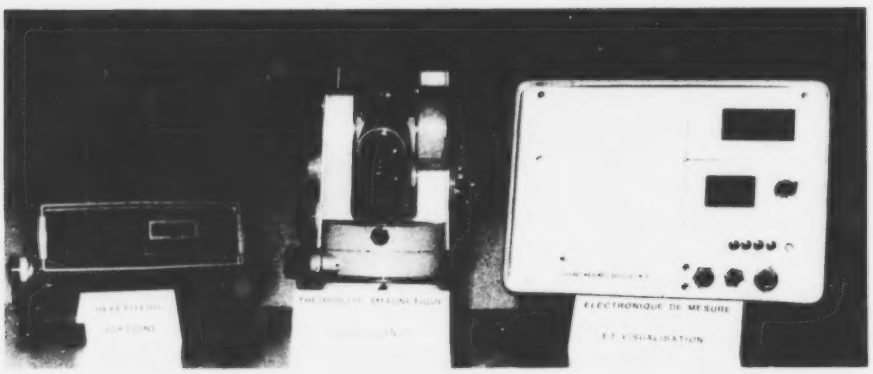


Figure 6.6 Vue de l'équipement du magnétomètre portatif IPGS.

la mesure; ce boitier est suffisamment amagnétique pour pourvoir être placé à proximité immédiate du théodolite. L'ensemble du matériel, théodolite, sonde, électronique de mesure, boitier répétiteur est représenté sur la figure 6.6.

Les principales caractéristiques de cet appareil ont déja été données par ailleurs (Bitterly et coll., 1984); les spécifications complètes sont précisées ailleurs dans ce compte rendu (section 3). La théorie générale et la méthodologie de mesure sont explicitées dans le « mode d'emploi » de l'appareil (document interne de l'Institut de Physique du Globe de Paris, 1980 non publié).

La théorie des mesures de déclinaison et d'inclinaison effectuées avec ce type de magnétomètre théodolite a récemment été reprise en détail par Lauridsen (1985), qui donne également une analyse des principaux défauts et erreurs pouvant affecter la précision des déterminations. Il faut souligner que la méthode de mesure utilisée élimine directement les erreurs instrumentales si ces dernières peuvent être considérées comme constantes pendant toute la durée d'une mesure. Les dérives ou instabilités mécaniques d'origine thermique peuvent donc affecter la précision des déterminations. Le choix des matériaux de construction de la sonde à vanne de flux et de son support nous

a permis de réduire les déformations mécaniques provoquées par les variations de température. En général les défauts de non coïncidence entre l'axe magnétique de la sonde et l'axe optique de la lunette peuvent être minimisés à moins de trente secondes d'angle par un réglage du support de sonde. La valeur de ces défauts résiduels est calculée par l'opérateur après chaque série de mesure; on dispose ainsi d'un critère de contrôle de la stabilité mécanique de l'ensemble du montage. Les dérives d'origine électronique doivent également être prises en compte: le capteur à vanne de flux est utilisé en détecteur de champ nul (mesures de D et de I), les caractéristiques de sortie du capteur doivent rester stables pendant la durée de la mesure. Le réglage optimum des circuits d'excitation et de détection permet de négliger l'effet des dérives du circuit magnétomètre. Il reste que pour une sonde à vanne de flux placée en champ nul le signal de sortie n'est pas rigoureusement égal à zéro. La valeur de ce décalage peut être facilement estimée en calculant algébriquement la demi-somme des mesures obtenues en positionnant la sonde parallèle et anti-parallèle au champ à mesurer; cette valeur est de l'ordre de quelques nanotesla. Primdahl (1979) montre que l'erreur de sonde peut varier suivant un processus d'hystérésis magnétique, en fonction de la valeur du champ magnétique suivant l'axe de la sonde. Nous avons donc réalisé un circuit anti-saturation permettant à la sonde de fonctionner en permanence en champs quasi-nul. Dans ces conditions l'erreur de sonde peut être considérée comme stable quelque soit la position prise par la lunette lors des retournements imposés par la méthode de mesure de D ou de I; elle n'influe pas sur la précision des déterminations.

Pour des levés magnétiques en campagne les mesures des composantes horizontales ou verticale (H,X,Y,Z) sont souvent utiles et complémentaires aux mesures de D et de I. Pour certains observatoires « polaires » la mesure directe de X et Y devient une necessité. Le magnétomètre théodolite a été adapté pour mesurer directement en nT le champ magnétique dans une direction quelconque (Bitterly et al.,1984). Pour que cette mesure soit possible il est nécessaire d'appliquer à la sonde un courant de compensation permanent qui annule la partie principale du champ à mesurer. La connaissance de la valeur exacte du champ compensé et la mesure du champ résiduel vu par la sonde permettent de calculer la valeur du champ magnétique dans la direction considérée à condition d'élaborer une procédure de mesure permettant d'éliminer les effets liés aux défauts d'appareillage déjà mentionnés (erreur de sonde, défauts de site et d'azimut).

La mesure du champ résiduel vu par la sonde ne pose pas de difficulté particulière avec un montage « parallèle » à deux noyaux saturés. En effet pour ce magnétomètre à contre-réaction, la linéarité entre le niveau du signal détecté et le champ à mesurer est meilleure que 1 nT pour une dynamique de 1000 nT si l'ensemble du noyau est soumis à un champ d'excitation homogène de niveau suffisant et si le gain de boucle est élevé. Par contre pour que la détermination de la valeur de champ compensé soit exacte il faut disposer d'un générateur de compensation stable, ultra-linéaire et dont la calibration puisse être vérifiée facilement. Un générateur de ce type a été construit et intégré au coffret de mesure du magnétomètre. La linéarité, meilleure que 10^{-5}, est obtenue en filtrant une impulsion du rapport cyclique réglable et précis. Le courant de compensation est rigoureusement proportionnel au rapport cyclique de l'impulsion et à la valeur de la tension de référence. Ce générateur ne nécessite pas de réglage et sa linéarité n'est pas susceptible de se dégrader. La stabilité thermique de ce générateur est meilleure que 1 ppm/°C, sa stabilité à long terme est de l'ordre de 20 ppm par an.

La calibration du courant de compensation est effectuée en comparant, au même instant, la valeur du champ total mesuré à l'aide du théodolite à vanne de flux et la valeur du champ total mesuré avec un magnétomètre à protons. On détermine le facteur correctif du courant de compensation par quatre retournements de la sonde orientée dans la direction du champ total F. Pour positionner l'axe de la sonde suivant cette direction on oriente préalablement la sonde dans le méridien magnétique perpendiculairement à la direction du champ total (recherche du zéro électrique); à partir de cette position il suffit d'effectuer une rotation de 90 degrés dans le plan vertical pour orienter la sonde dans la direction du champ total. L'écart résiduel d'orientation de l'axe magnétique de la sonde par rapport à la direction du champ total n'entraîne pas d'erreur appréciable de calibration s'il est inférieur à 10 minutes d'angle. La valeur approchée de l'erreur de sonde peut être facilement contrôlée à partir des quatre lectures effectuées. On constate que les variations extrêmes de la valeur du coefficient de calibration sont inférieures à 2×10^{-5} pendant une heure de fonctionnement.

Les mesures de H,X,Y,et Z sont faites immédiatement après la calibration du générateur de courant; on effectue les quatre retournements habituels de l'ensemble sonde-lunette pour éliminer les défauts d'appareillages. La mesure de deux composantes, y compris la calibration préalable, est effectué en moins de 20 minutes.

Résultats obtenus pour les mesures de la déclinaison et de l'inclinaison.

Estimation de la dispersion instrumentale.

Pour les mesures de D et de I les principales causes de dispersion des résultats sont les suivantes:

— l'estimation des lectures des cercles du théodolite par l'opérateur: ± 1 seconde d'arc dans le meilleur des cas;
— la résolution du magnétomètre à vanne de flux (ensemble sonde et électronique de mesure): le bruit global du capteur est inférieur à 0,2 nT;
— les erreurs systématiques liées à la réduction des mesures absolues à l'aide des données enregistrées par le variomètre: la résolution du variomètre triaxial est de 0,1 nT;
— les erreurs systématiques introduites par l'utilisation des mesures de champ total F pour calculer les lignes de bases Ho et Zo à partir des mesures d'inclinaison: la résolution du magnétomètre à protons est de 0,25 nT, sa précision absolue de ± 1 nT;
— les erreurs accidentelles dépendant de l'opérateur ou des indéterminations liées à l'existence d'un gradient de champ magnétique à l'emplacement des mesures.

Il est possible d'estimer globalement la dispersion instrumentale en analysant les valeurs de base calculées pour des couples de mesures de la déclinaison et de l'inclinaison effectuées au pilier de référence de l'observatoire. L'écart calculé pour deux déterminations successives de D (ou de I) est représentatif de la dispersion; les mesures étants effectuées en général à 5 minutes d'intervalle on s'affranchi des dérives éventuelles du variomètre. Pour 155 couples de détermination Do, Ho et Zo calculés à l'observatoire de Port Alfred (Crozet) en 1985 nous obtenons:

Composante	Dispersion maximum	Dispersion moyenne
D	15″	4,5″ (écart type 3,8″)
H	1,1 nT	0,3 nT (écart type 0.25 nT)
Z	0,8 nT	0,25 nT (écart type 0.5 nT)

Ces résultats montrent que la dispersion instrumentale reste inférieure à 5 secondes d'arc pour les mesures de D et I, ce qui correspond à une dispersion de l'ordre de 1 nT pour les valeurs calculées de H et Z à partir des mesures de I et de F.

Comparaison directe du magnétomètre théodolite portable et des étalons standards: précision et fidélité des mesures.

À l'observatoire de Chambon la Forêt, l'analyse des données disponibles pour la période 1979-1980 avait montré un bon accord entre les déterminations faites avec le magnétomètre théodolite et les étalons classiques de l'observatoire, c'est-à-dire avec l'inclinomètre de Cambridge, les QHM et le théodolite Brunner. Les différences moyennes calculées étaient de 11 secondes pour la déclinaison, de 1 nT pour la composante horizontale et de 0,3 nT pour la composante verticale. Cependant, nous avions signalé (Bitterly et al., 1984) que ces écarts résiduels ne devaient pas être considérés comme significatifs car ils étaient du même ordre de grandeur que l'erreur instrumentale probable commise avec les appareillages classiques utilisés. En novembre 1983 à l'observatoire de Brorfelde, une première série de mesures comparatives ont été effectuées entre un magnétomètre théodolite portable de l'Institut de Physique du Globe de Paris et le système proton-vecteur utilisé à Brorfelde. Lauridsen (1985) note « that when these QD's and the D-coil were compared, with a french Di-flux in november 1983 there was practically agreement between all instruments ».

Pour illustrer et préciser cette conclusion, nous avons comparé les résultats de 186 séries de mesures effectuées sur 18 mois à l'observatoire de Chambon-la-Forêt. Le magnétomètre théodolite portable était utilisé au pilier de référence P1 de l'observatoire; le magnétomètre proton-vecteur était installé sur un pilier annexe P3.

Les valeurs de base Ho et Zo calculées pour chaque appareil ainsi que les différences respectives sont representées sur la figure 6.7. Pour l'ensemble de l'année 1985 les différences moyennes obtenues sont les suivantes:
Ho proton vecteur (P3) − Ho Di-flux (P1) = −0,4 nT (écart-type 1,3 nT)

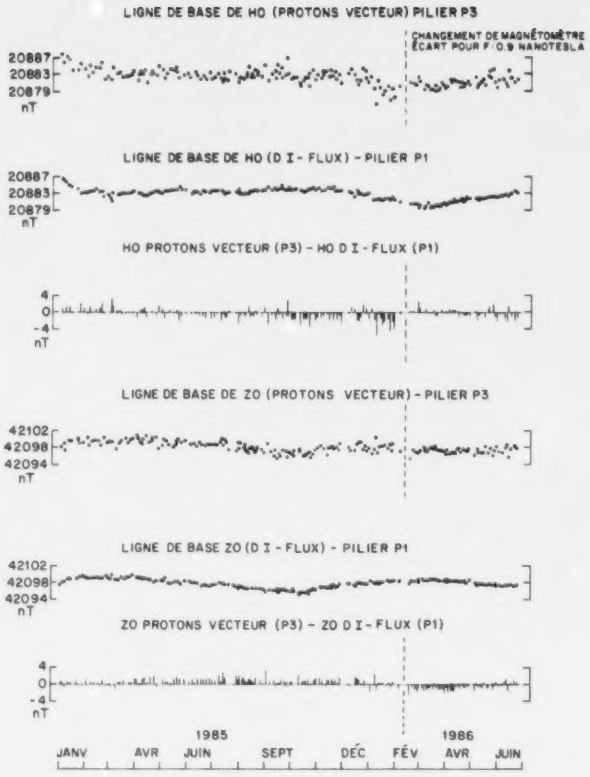


Figure 6.7 Valeurs des lignes de base pour l'observatoire magnétique Chambon la Forêt de janvier 1985 à juin 1986 avec le magnétomètre à théodolite DI et le magnétomètre vectoriel à protons.

Zo proton vecteur (P3) − Ho Di-flux (P1) = 0,7 nT (écart-type 0,8 nT)
L'écart de champ total entre les piliers P3 et P1 est donné par la relation: F pilier P3 − F pilier P1 = −0,9nT ±0,3nT.

Les différences moyenne calculées pour les six premiers mois de 1986 sont légèrement différentes: pour Ho on obtient −0,6nT et pour Zo on obtient −0,7nT . Le remplacement, le 11 février 1986, du magnétomètre à protons utilisé dans le système de bobines au pilier P3 peut raisonnablement expliquer ce changement; à cette date la discontinuité des valeurs de Zo est bien visible sur la figure 6.7.

L'accord entre les valeurs H et Z calculées à l'aide du magnétomètre théodolite portable d'une part et avec le système magnétomètre proton-vecteur d'autre part est excellent. L'écart observé est inférieur à 1 nT, il reste stable durant la période de 18 mois considérée. Ce résultat atteste que la précision des mesures de H et Z est meilleure que ±1 nT. Le magnétomètre théodolite portable est un instrument précis et fidèle.

Résultats obtenus pour les mesures directes des composantes X, Y, et Z, par la méthode de compensation: analyse des mesures faites à l'observatoire de Dumont-d'Urville (Terre Adélie) en 1985.

La position de l'observatoire magnétique de Dumont d'Urville, situé à 160 km de la position du pôle magnétique de surface (localisation de 1986) et dans une zône d'agitation magnétique quasi-permanente complique la tâche de l'observateur chargé des mesures absolues. Les mesures classiques de D et I ne sont pas valables à un endroit où les éléments du champ terrestre avaient pour valeur moyenne (en 1985) X = 1288 nT, Y = −445 nT, Z = −69 873 nT et F = 69 886 nT.

En Terre Adélie le magnétomètre théodolite portable est utilisé pour la mesure directe des composantes X,Y,Z (méthode de compensation) en association avec un magnétomètre Geometrics G816 spécialement adapté pour obtenir une résolution de 0,25 nT.

Les valeurs de base Xo, Yo, Zo ainsi que la différence Fo de champ total, existant entre l'abri variomètre et l'abri de mesures absolues sont représentés sur la figure 6.8. On observe une évolution saisonnière des lignes de base pour les composantes X et Y. Cet effet est dû, au moins en partie, à l'instabilité du pilier du variomètre. Les variations d'inclinaison du pilier sont contrôlées périodiquement à l'aide de deux niveaux: l'amplitude observée pour ces variations atteint 45 secondes d'angle dans la direction est-ouest. Les effets saisonnier observés sont par ailleurs corrélés directement à l'évolution de la température moyenne du sous-sol.

Il faut noter que des considérations logistiques ont imposé le site de l'observatoire de Dumont d'Urville installé à l'occasion de l'Année géophysique internationale de 1957, ce site est malheureusement situé sur une anomalie magnétique locale très importante. Une situation semblable existe d'ailleurs pour l'observatoire antarctique de Scott Base ou des effets similaires ont été signalés (Rodgers, 1980). Dans ces conditions il est clair que les mesures absolues doivent être effectuées régulièrement et souvent. Le magnétomètre théodolite portable installé en Terre Adélie depuis 1981 est particulièrement bien adapté à cet objectif. En 1985 l'analyse des 124 couples de déterminations effectués au cours de l'année montrent que la dispersion moyenne des valeurs de base peut être estimée à 0,6 nT (l'écart maximum observé entre deux mesures consécutives effectuées aux instants t1 et t2 est de 2,3 nT).

1985	Écart maximum	Dispersion moyenne	Écart quadratique
Xo(t1)-Xo(t2)	2,3 nT	0,6 nT	0,4 nT
Yo(t1)-Yo(t2)	2,3 nT	0,5 nT	0,5 nT
Zo(t1)-Zo(t2)	2,0 nT	0,7 nT	0,5 nT

Compte tenu de la situation particulière de l'observatoire de Dumont d'Urville les valeurs de Z et de F sont directement comparables (la « différence » entre Z et F n'est que de 13 nT). Les valeurs de Zo et de Fo reportées sur la figure 6.8 sont parfaitement corrélées. Ceci illustre la stabilité du générateur de courant de compensation du

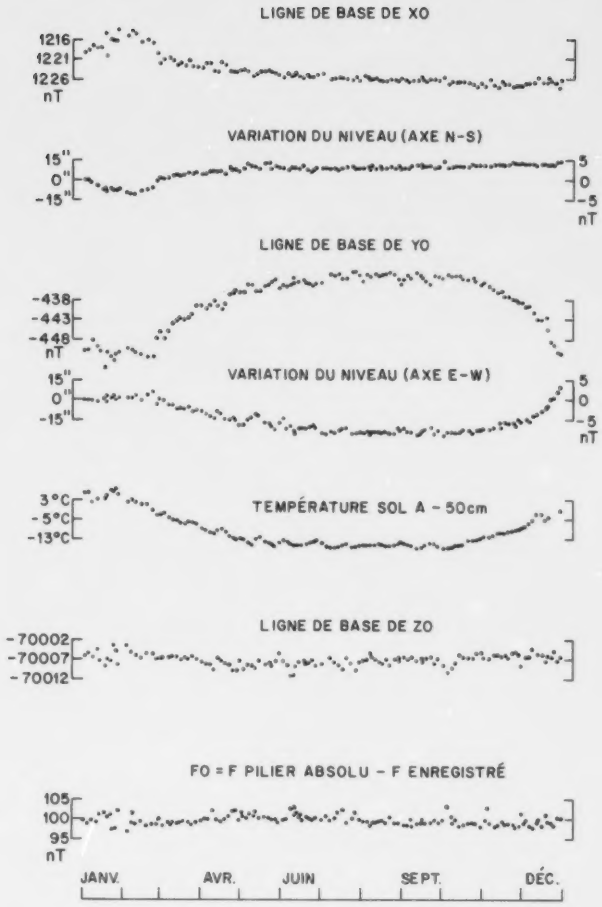


Figure 6.8 Variations du niveau, de la température et des lignes de bases pour 1985 à l'observatoire magnétique Dumont d'Urville.

magnétomètre pour des champs importants (70000 nT) et donc à fortiori pour des champs compensés plus faibles (1300 nT pour la composante horizontale). En calculant la moyenne arithmétique des 248 déterminations de Zo pour l'année 1985 on obtient un écart type de 1,4 nT. Cette valeur peut significativement être considérée comme étant la précision des mesures directes de composantes effectuées en Terre Adélie avec le magnétomètre théodolite portable.

Emploi du magnétomètre théodolite portable à vanne de flux pour les mesures aux stations de magnétiques de répétition

Le magnétomètre portable à été utilisé pour la première fois en campagne lors de la réoccupation des stations magnétiques et de répétition de la France en 1982 (Gilbert et Le Mouel, 1984). Bien que les performances en observatoire soient connues il a été décidé de maintenir, pour cette campagne, l'usage des appareils classiques théodolite Chasselon et QHM. Un nouveau magnétomètre à protons (résolution 0,25 nT) a été utilisé en association avec les appareils de mesure des composantes.

Le réseau français comporte 32 stations, réoccupées tous les cinq ans. À chaque station, sur la borne de référence, on effectue de cinq à dix déterminations de D et I avec le théodolite à vanne de flux complétées par deux séries de mesure intercalées de H au QHM et de D avec le théodolite Chasselon. Les caractéristiques optiques du théodolite Zeiss 010B permettent de déterminer l'azimuth de la balise repères (méthode d'orientement sur le soleil par l'heure) avec une précision de ±20 secondes d'angle. Les mesures de F ont été faites systématiquement en même temps que les mesures de composantes en utilisant un point de station auxiliaire situé à une quinzaine de mètres de la borne. On a déterminé avec soin la différence de champ total existant entre le point de mesure, au dessus de la borne de référence, et l'emplacement du point auxiliaire, le magnétomètre à protons a été comparé, à chaque station, avec un second magnétomètre de même précision. Toutes les mesures (D, I et F, sauf celles au théodolite Chasselon) sont faites à la minute ronde donc en simultanéité avec les informations « champ magnétique » fournies par le variomètre triaxial de l'observatoire de référence.

La réduction des mesures a été faite à partir des données fournies par le variomètre VFO 31 installé en 1978 à l'observatoire de Chambon-la-Forêt. Les performances du magnétomètre théodolite et la procédure de réduction utilisée permettent d'améliorer notablement la précision des déterminations des valeurs réduites, comme le montre la comparaison des incertitudes résultantes, estimées pour les réoccupations de 1977 et de 1982.

Incertitude sur	1977	1982
D	2,5′	1′
H	7 nT	4 nT
Z	–	3,5 nT
F	7 nT	4 nT

Ces incertitudes résultent des erreurs de mesure à la station, des erreurs sur la détermination de l'élément considéré à l'observatoire, et des erreurs de réduction des variations transitoires. L'incertitude résultante estimée ci-dessus devrait être notablement réduite lors de la prochaine campagne (1987) par un enregistrement systématique, durant quarante huit heures, des variations des composantes du champ magnétique à la station. Les données numériques obtenues permettant de réduire localement les mesures, en les ramenant à l'heure où la variation journalière à la station et à l'observatoire sont les plus proches du niveau moyen.

Début 1986 l'Institut de Physique du Globe de Strasbourg a réalisé une campagne de mesures magnétiques dans les îles subantarctiques françaises (station de la Baie Américaine dans l'archipel des Crozet, station de Port Jeanne d'Arc et de la baie de l'Observatoire aux îles Kerguelen, et station de l'île Saint Paul). Le matériel mis en oeuvre comportait un magnétomètre théodolite portable à vanne de flux et ses accessoires ainsi qu'un équipement autonome pour la mesure et l'enregistrement du champ total F. La précision des mesures réduites est du même ordre que celles du réseau métropolitain.

Au cours de ces deux campagnes les observateurs ont apprécié la commodité d'emploi du magnétomètre théodolite portable en site isolé. Il est remarquable que même dans dans ces conditions, relativement difficiles, une série de mesures de déclinaison et d'inclinaison est effectuée en moins de quinze minutes.

Conclusion

Le magnétomètre théodolite portable pour la mesure des éléments du champ magnétique terrestre a été construit en quatorze exemplaires; sept observatoires magnétiques permanents l'utilisent comme appareil de référence depuis plusieurs années. C'est un appareil absolu, précis et fiable. Utilisé en détecteur de champ nul, il permet de mesurer la déclinaison et l'inclinaison avec une précision meilleure que 5 secondes d'arc. Lorsqu'on utilise une méthode de compensation le magnétomètre théodolite est alors un appareil pseudo absolu facile à calibrer en association avec un magnétomètre à protons; dans ce cas il permet de mesurer n'importe quelle composante du champ magnétique terrestre avec une précision de l'ordre du nanotesla. La mise en station de l'appareil et l'exécution des mesures ne requérant pas davantage de précautions que celles habituellement nécessaires pour l'emploi d'un théodolite « seconde », les mesures peuvent être effectuées rapidement et simplement. Ces caractéristiques permettent de proposer ce magnétomètre théodolite à vanne de flux pour remplacer les appareils classiques utilisés dans les observatoires magnétiques et pour effectuer les mesures de terrain dans les stations magnétiques de répétition ou lors de levés magnétiques.

Remerciement

L'étude et la réalisation de cet appareillage ont été financées conjointement par l'Institut National des Sciences de l'Univers et par le Territoire des Terres Australes et Antarctiques Françaises.

Bibliographie

Bitterly, J., Folques, J., Schlich, R., Schaming, M. et Blanchard, A.
1983: Observations magnétiques faites à l'observatoire de Port-aux-Français, 1981; fascicule de l'Institut de Physique du Globe de Strasbourg, 1-60.

Bitterly, J., Cantin, J.M., Schlich, R., Folques, J., et Gilbert, D.
1984: Portable magnetometer theodolite with fluxgate sensor for earth's magnetic field component measurements; Geophysical surveys v. 6, p. 233-239.

Cantin, J.M., Gilbert, D., Bitterly, J. et Schlich, R.
1979: Magnétomètre portable pour la mesure de la Déclinaison et de l'Inclinaison du champ magnétique terrestre; Communication présentée à la XVIIème Assemblée Générale de l'UGGI, WGV-1, Canberra, décembre 1979.

Cantin, J.M.
1980: Méthode et appareil de mesure du champ magnétique terrestre; Diplôme d'ingénieur D.P.E., École Nationale Supérieure de Radioélectricité et d'Électronique Appliquée, Cergy Pontoise, octobre 1980.

Fischer, G. et Schnegg, P.A.
1977: Le nouveau levé géomagnétique de la Suisse, dans: Vermessung, Photogrammétrie, Kulturtechnik n° 8-77, p. 253-261.

Fischer, G., Schnegg, P.A. et Sesiano, J.
1979: A new portable vector magnetometer for geomagnetic surveys, dans: A new geomagnetic survey of Switzerland; Geophysical series, report n° 19, p. 13-17.

Gilbert, D. et Le Mouel, J.L.
1984: Observations magnétiques, réseau magnétique de répétition de la France, 1982; fascicule n° 50, Institut de Physique du Globe de Paris, p. 1-34.

Lauridsen, E.K.
1985: Experiences with the DI Fluxgate magnetometer inclusive theory of the intrument and comparison with other methods; Danish Meteoerological Institute. Geophysical Papers R 71, p. 1-23.

Meyer, O. et Voppel, D.
1954: Ein theodolit zur Messung des Erdmagnetischen Feldes mit der Förstersonde als Nullfeldindikator: Deutsche Hydrographische Zeitschrift, v. 7, p. 73-77.

Primdahl, F.
1979: The Fluxgate magnetometer; Journal of Physics E: Scientific Instruments, v. 12, p. 241-253.

Rodgers, T.A.
1980: Seasonal variations in the La Cour baselines values at Scott base, Antarctica; IAGA news n° 18, p. 108-112.

Serson, P.H. et Hannaford, W.L.W.
1956: A Portable electrical magnetometer; Canadian Journal of Technology, v. 34, p. 232-243.

Tetani, M.
1941: Nuvo metodo di misura della declinazione e della inclinazione magnetica; La ricerca scientifica, v. 20, p. 1135-1140.

Trigg, D.F.
1970: A portable D and I magnetometer; Geomagnetic Laboratory Report n° 70-3, Direction de la physique du Globe, Énergie, Mines et Ressources, Ottawa, Canada.

Usher, M.J. et Reid, J.P.
1978: An absolute vector magnetometer; Journal of Physics E: Scientific Instruments, v. 11, p. 1169-1172.

Yanagihara, K., Kawamura, M., Sano, Y. et Kuboki, T.
1973: New standard magnetic observation system of Kakioka (KASMMER). The Geophysical Magazine v. 36, n° 4, p. 236-243.

CRITÈRES DE QUALITÉ POUR LES OBSERVATOIRES RAREMENT VISITÉS OU AVEC PERSONNEL RÉDUIT

R.L. Coles, G. Jansen van Beek et L.R. Newitt

Un point important qu'il faut éclaircir dès le début, est d'établir qu'un critère fondamental de qualité des données d'un observatoire ne tient pas au fait que l'observatoire soit entièrement habité, partiellement habité ou non habité. Un observatoire non habité, dont la conception, l'aménagement et l'exploitation est au point, peut en principe produire des données d'aussi bonne qualité qu'une station entièrement habitée. La technologie appropriée existe, le reste n'est qu'une question d'argent. En réalité, il est évident qu'un observatoire non entièrement habité est souvent considéré comme un moyen d'économiser de l'argent, ou du moins d'économiser de la main-d'oeuvre. Même dans ce cas non idéal, un observatoire numérique automatique peut donner d'aussi bons résultats que la meilleure station entièrement habitée.

Une station non habitée s'entend d'une station qui est visitée moins d'une fois par mois par un opérateur. Une station entièrement habitée nécessite les services d'un opérateur à tous les jours. Entre ces deux extrêmes, se trouve la station partiellement habitée.

Dans le passé, la technologie des stations partiellement ou non habitées ne permettait pas de déceler et de réparer les défectuosités aussi rapidement que dans les stations entièrement habitées, ce qui donnait lieu à des pertes de données ou à une diminution de la qualité des données. Le magnétomètre, les enregistreurs ou l'environnement posaient parfois des problèmes, et il n'était pas toujours possible d'intervenir rapidement sur place. Avec l'avènement des liaisons téléphoniques quotidiennes avec les observatoires (comme c'est le cas au Canada), les temps d'arrêt dans les stations partiellement ou non habitées peuvent être réduits, et la qualité, améliorée. Au cours des dernières années, la fiabilité du matériel électronique a aussi été améliorée. Par exemple, le réseau canadien de 12 observatoires standard présente un taux général de récupération des données supérieur à 98 %.

Dans les observatoires non entièrement habités, il arrive souvent que les mesures absolues et le contrôle absolu des données soient de qualité moindre. Grâce aux derniers progrès de la technologie, ces problèmes peuvent devenir moins sérieux. Avec des variomètres plus stables, un contrôle et une surveillance plus efficaces de l'environnement, on peut diminuer la fréquence des mesures absolus, sans que cela n'élimine pour autant leur nécessité. Ces améliorations représent un avantage pour tous les observatoires, quel que soit le personnel employé.

Une bonne installation, laquelle dépend de la stabilité du support, est essentielle à la précison des mesures. Un variomètre ne peut être très stable que s'il repose sur un support lui-même très stable.

Lorsque l'équipement et le milieu sont adéquats (quitte à recourir à la surveillance à distance si nécessaire), la qualité des observations repose sur la disponibilité, à proximité de l'observatoire, d'un technicien suffisamment formé et compétent qui peut, suivant un calendrier, effectuer les mesures absolues, et qui peut visiter la station pour effectuer les réparations requises (le plus souvent diagnostiquées à partir de l'administration centrale). En général, il est difficile d'obtenir et de retenir les services d'une telle personne, surtout lorsque l'observatoire se trouve dans une région éloignée où le climat est rigoureux.

Pendant plus de deux décennies, le Canada a exploité un réseau d'observatoires automatiques partiellement habités dans divers milieux, en recourant à des opérateurs contractuels plus ou moins compétents et motivés. L'expérience a montré qu'il est possible d'obtenir des données de qualité similaires à celles provenant d'un grand nombre d'observatoires entièrement habités. Cela ressort des tracés des lignes de base Y de Victoria et X de Meanook (fig. 6.9). Les dispersions quadratiques moyennes de 1,0 nT et de 1,3 nT respectivement sont aussi représentatives de celles des autres composantes mesurées dans ces stations.

Au cours des années, nous avons rencontré la plupart des problèmes qui sont propres à un réseau d'observatoires partiellement habités. Les fortes perturbations magnétiques, qui sont fréquentes sur la calotte polaire et dans les observatoires auroraux, peuvent fausser les observations absolues. Dans un observatoire entièrement habité, l'opérateur attend la fin d'une perturbation magnétique pour faire des observations absolues. Dans les observatoires partiellement habités, il n'en va pas de même en général.

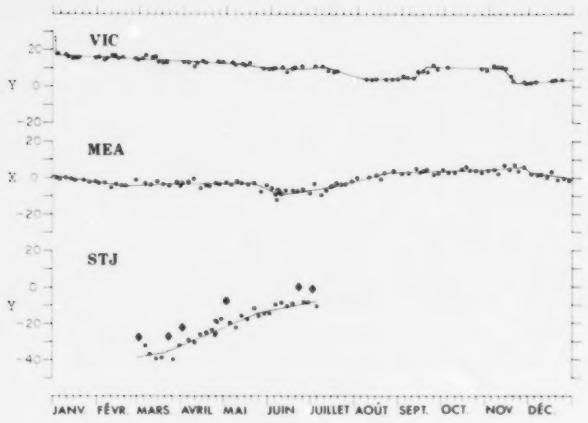


Figure 6.9 Valeurs des lignes de bases pour les observatoires magnétiques de Victoria, Meanook et St. John's en 1986.

Les opérateurs contractuels visitent normalement les observatoires à des heures fixes et peu d'entre eux consentent à répéter une visite à seule fin de faire des observations absolues dans des conditions optimales.

Dans certains observatoires de l'extrême Nord, comme à Resolute Bay, les observations absolues sont rendues plus difficiles en raison de la faible intensité horizontale. Les observations de la déclinaison dans ces conditions requièrent des aptitudes et une attention particulières ainsi qu'une connaissance du principe de fonctionnement de l'instrument, ce qui est rarement le cas des observateurs à temps partiel.

Lorsque les capteurs ou les circuits électroniques du magnétomètre présentent des coefficients de température importants, la stabilité thermique dans le bâtiment d'un observatoire est critique. Dans certains observatoires qui n'emploient aucun opérateur à temps plein, il est souvent plus difficile d'obtenir la stabilité recherchée. Pour atténuer ce problème dans le réseau canadien, les capteurs de tous les observatoires ont été entièrement isolés dans des enceintes à température contrôlée; toutefois, il s'est avéré plus difficile de stabiliser la température des circuits électroniques qui présentent un coefficient de température élevé.

Un autre type de problème ressort des tracés des lignes de base de 1985 de l'observatoire de St-John's (fig. 6.9). Les points gras correspondent aux observations effectuées par l'opérateur auxiliaire. Un écart systématique entre ses observations et celles de l'opérateur principal est évident. L'écart est le plus grand pour ce qui est des lignes de base Y, ce qui indique que le problème se pose pour les observations de D. Il s'agit encore là d'un problème directement lié à la compétence et à l'expérience de l'observateur. Ces problèmes sont extrêmement difficiles à résoudre parce que les observatoires ne sont habituellement visités qu'une seule fois par année par le personnel de l'administration centrale, et que les fonds permettent rarement des visites additionnelles.

Le défi que doivent donc relever les scientifiques et les ingénieurs est celui de produire désormais une nouvelle génération d'observatoires numériques automatiques permettant un contrôle absolu véritable (c'est-à-dire par rapport aux coordonnées géographiques et non par rapport à des approximations arbitraires ou saisonnières) qui minimiseraient le niveau de compétence exigé des opérateurs locaux. Ce sont définitivement les mesures absolues qui requièrent le plus de compétence. À moins de réduire cette contrainte, les coûts d'exploitation demeureront élevés, et le contrôle absolu des données accusera une importante perte de qualité.

7. MATIÈRES SPÉCIALES

PROBLÈMES POSÉS DANS LES PAYS EN VOIE DE DÉVELOPPEMENT PAR L'ENREGISTREMENT NUMÉRIQUE DES DONNÉES AUX OBSERVATOIRES MAGNÉTIQUES

D.R.K. Rao

Note du rédacteur: à la demande de plusieurs participants une séance de discussions fut organisé au cours de l'atelier, elle fut dirigé par D.R.K. Rao. Un résumé de ces discussions est présente ci-dessous.

Introduction

Les discussions porteront sur trois aspects de la question:

1. Arguments en faveur de la conversion analogique-numérique;
2. Instruments et matériel de traitement des données nécessaires à cette conversion; et
3. Moyens que peut prendre la collectivité internationale pour aider les pays en voie de développement.

Conversion analogique-numérique

Voici un résumé des arguments en faveur du remplacement des méthodes classiques par des méthodes d'enregistrement numérique:

A. Les utilisateurs des milieux scientifiques et commerciaux ont presque exclusivement besoin de données géomagnétiques sous forme numériques.
B. L'enregistrement numérique permet de préparer les données facilement, rapidement et avec exactitude (y compris des annuaires au besoin), sans qu'il soit nécessaire d'effectuer de fastidieux travaux manuels de tabulation et de mise à l'échelle. De nombreux observatoires ont pris du retard dans le calcul et la publication de leurs données et, souvent, ils ne peuvent liquider l'arrière de travail. Le traitement des données numériques solutionnerait ce problème.
C. L'adoption des données numériques permettrait de diminuer les coûts généraux de main-d'oeuvre et de matériaux (papier photographiques et produits chimiques). Les économies ainsi réalisées compenseraient le coût en capital de l'installation du matériel numérique. De plus, bien des pays ont de la difficulté à tenir des stocks de papier photographique de la dimension et de la qualité voulue.
D. Pour un observatoire, l'adoption de données numériques représente un avancement technologique qui peut avoir des répercussions ailleurs au pays et jeter les bases de l'expansion de la recherche scientifique et commerciale du pays. À cet égard, on estime que la technologie numérique est un catalyseur beaucoup plus puissant que les observations classiques.

Besoins en matériel

Voici les éléments de base d'un système d'acquisition de données numériques:

A. Capteurs de variomètres qui produisent un signal électrique proportionnel à la variation du champ
B. Dispositif de conversion analogique-numérique
C. Système approprié d'enregistrement des données
D. Système informatisé de traitement des données.

En général, on estime que chaque pays doit choisir un appareil d'enregistrement des données et un ordinateur en fonction des installations informatiques dont il dispose et de la facilité avec laquelle il peut obtenir des pièces et des services d'entretien pour les ordinateurs et les unités périphériques. Toutefois, il est recommandé de songer d'abord à la souplesse d'utilisation et, à cet égard, on a souligné que les systèmes fondés sur des ordinateurs personnels sont peu coûteux et très pratiques. Ces ordinateurs sont également très faciles à utiliser. Le système élémentaire de traitement des données comprend un micro-ordinateur (comparable aux ordinateurs personnels) doté d'une unité d'entrée-sortie qui lit les données provenant de l'enregistreur, préférablement relié à des unités de disques rigides ou souples, d'un terminal graphique permettant de contrôler la qualité, d'une imprimante et d'un traceur pour les enregistrements analogiques.

Aide internationale

Il faut se procurer un logiciel pour les opérations courantes de traitement et de contrôle de la qualité des données (pour établir des tableaux de la valeur moyenne et pour effectuer le traçage analogique et le transfert des données dans les mémoires de grande capacité ou les installations de calcul de l'ordinateur central). On estime qu'il serait impossible d'établir des logiciels standards s'adaptant à tous les ordinateurs, mais on a pensé que des opérateurs d'expérience pourraient fournir des copies des principaux programmes pour aider le personnel des pays en voie de développement.

La formation du personnel en informatique dans les pays en voie de développement demeure l'un des obstacles majeurs à l'adoption, à l'échelle mondiale, d'installations d'enregistrement numérique. On a recommandé qu'un établissement qui envisage d'adopter les données numériques demande toujours l'avis d'un autre établissement qui a déjà fait ses preuves dans le domaine. Ces deux établissements pourraient ensuite demander à des organismes nationaux ou internationaux de financer la formation, au sein de l'établissement le plus avancé, du personnel technique de l'observatoire qui veut se doter d'un système d'enregistrement numérique.

On a également proposé que des établissements reconnus effectuent des inspections ou des essais avant la livraison du matériel acheté par des pays qui doutent de leurs compétences techniques.

Aujourd'hui encore, plus de 100 observatoires ne possèdent pas de matériel d'enregistrement numérique qui réponde aux normes d'un observatoire géomagnétique. Ils sont pour la plupart situés dans les pays en voie de développement, dans la zone équatoriale et l'hémisphère sud. Sans les données obtenues de ces observatoires, il est impossible de produire des modèles mathématiques exacts du champ principal et de ses variations séculaires, modèles qui sont essentiels à la navigation internationale et qui constituent la base de la recherche fondamentale sur le noyau de la Terre, l'évolution dynamique de la Terre, de même que la modélisation de la magnétosphère terrestre. On a recommandé que des scientifiques de pays en voie de développement collaborent à l'élaboration d'un projet international en misant sur la situation exceptionelle de ces observatoires pour étudier le champ géomagnétique global ou l'aéronomie équatoriale. On est parfaitement conscient que, dans l'avenir, les magnétomètres montés à bord de satellites fonctionneront à partir de données de référence terrestre de qualité supérieure, enregistrées sous forme numérique par des stations situées dans des régions équatoriales, et fourniront en retour des données précieuses dans le cadre d'un programme de recherche sur l'aéronomie équatoriale.

On a demandé à la Commission interdivisionnaire de l'AIGA, qui s'occupe des problèmes des pays en voie de développement, de prendre des mesures en faveur des observatoires géomagnétiques. À titre d'exemple, mentionnons la création d'une liste d'organismes internationaux de financement susceptibles d'appuyer les observatoires à effectuer la conversion analogique-numérique, soit en achetant du matériel ou en accordant des fonds pour la formation. Il est souvent arrivé que des établissements de pays industrialisés aident des pays en voie de développement. L'AIGA devrait préparer une liste de ces établissements, en y indiquant le type d'aide et le nom de tout organisme international participant, et la diffuser aux observatoires magnétiques. Elle devrait toutefois préciser que les directeurs des observatoires ayant besoin d'aide ou de conseils doivent d'abord s'adresser à un établissement reconnu intéressé à collaborer, qui pourra les aider à trouver un organisme international prêt à financer le projet.

DÉFINITION DES TERMES UTILISÉS DANS LA DESCRIPTION DES SPÉCIFICATIONS POUR LES INSTRUMENTS DE GÉOMAGNÉTISME

Barry Narod

Introduction

Des inconsistances ont été relevées dans l'utilisation de la terminologie relative aux techniques de géomagnétisme et il a été jugé utile de définir de manière spécifique un certain nombre de termes couramment utilisés dans les comparaisons des performances des instruments en géomagnétisme.

Unité de H:
L'unité fondamentale d'intensité de champ magnétique H dans le système SI est l'ampère/mètre (A/m). L'ancienne unité, l'oersted, est égale à $(10^3/4\pi)$ A/m.

Unité de B:
L'unité fondamentale d'induction magnétique B dans le système SI est le tesla (T). Comme la perméabilité du vide est égale à $4\pi \times 10^{-7}$ H/m, on a la relation suivante:

Induction magnétique (en T) = $(4\pi \times 10^{-7}$ H/m) × champ magnétique (en A/m)

L'ancienne unité, le gauss est égale à 10^{-4} tesla. Un gamma, ou nanotesla (nT) est égal à 10^{-9} tesla.

Termes décrivant les performances:

Sensibilité

La sensibilité d'un instrument est définie comme le rapport de son signal de sortie en unités techniques, à son signal d'entrée en unités physiques, ou comme l'inverse de ce rapport. Par exemple, la sensibilité d'un variomètre analogique peut être égale à 100 nT/V (100 nanoteslas par volt).

Force du signal

Les variations du géomagnétisme sont, par nature, des phénomènes présentant une certaine largeur de bande; en d'autres termes, leur spectre ne présente pas de raies fines. La force d'un signal doit donc être qualifiée par la bande spectrale considérée. Une description complète du signal devrait être donnée par incréments de fréquence successifs. Sa description la plus précise est son spectre de puissance, qui donne la puissance en fonction de la fréquence. En géomagnétisme, on utilise fréquemment le nT x nT/Hz comme unité de puissance spectrale. L'amplitude spectrale est égale à la racine carrée de la puissance spectrale.

Résolution

La résolution est la plus petite modification d'un signal qui peut être distinguée par un instrument. La résolution est généralement fonction du bruit, et donc de la bande de fréquences.

Précision

La précision est le plus petit incrément utilisable par un instrument pour donner une estimation du paramètre physique qu'il mesure. Pour les appareils à sortie numérique, c'est la mesure physique correspondant à la modification du chiffre le moins significatif.

Exactitude

Tout instrument utilisé pour fournir une mesure d'un paramètre physique donne une estimation de la valeur vraie (inconnue) de ce paramètre. L'exactitude est la différence entre cette estimation et la valeur vraie. Comme la valeur vraie n'est jamais connue, la mesure de la justesse ne peut elle-même être qu'une estimation, généralement dérivée de l'expérience technique.

Dynamique

La dynamique est le rapport, généralement exprimé en dB, de la valeur du signal maximal que l'instrument peut mesurer à la résolution de cet instrument. La dynamique peut aussi s'exprimer par ces deux valeurs, par exemple, de 0,1 nT à 1 000 nT. Comme la résolution, la dynamique peut être fonction de la bande de fréquence. La dynamique est généralement définie sans commutation de gamme de l'instrument.

Bruit de fond d'un instrument

Le bruit de fond d'un instrument a les mêmes caractéristiques que la force du signal. On l'exprime généralement en donnant le signal à l'entrée de l'instrument équivalent au bruit de fond, exprimé dans les mêmes unités physiques que le signal à mesurer. Comme pour la force du signal, le bruit doit normalement être exprimé sous forme de puissance spectrale.

Rapport signal sur bruit

Rapport, généralement exprimé en dB, de la force du signal au bruit de fond de l'instrument, exprimés tous deux sous forme de puissances spectrales. La résolution, la force du signal, le bruit de fond de l'instrument et le rapport signal sur bruit peuvent tous être fonction de la fréquence.

OBSERVATION ABSOLUE DE F AU MOYEN D'UN MAGNÉTOMÈTRE À PROTONS

W.F. Stuart

Au cours des séances de discussion lors de l'atelier, Emil Kring-Lauridsen a déclaré que:
« une mesure absolue d'un élément magnétique enregistré est une mesure de cet élément prise pendant un court intervalle de temps et avec la précision d'au moins de l'ordre de la résolution de l'instrument d'enregistrement, compte tenu de sa stabilité ».

Même si cette définition aborde les questions de la précision des mesures en fonction de la résolution de l'appareil de mesure et aussi du facteur temps, on a jugé qu'elle décrivait une mesure de laboratoire plutôt qu'une observation destinée à jauger l'importance scientifique du champ magnétique de la Terre en un point, lequel peut être influencé par plusieurs anomalies et des champs de perturbation extérieurs complexes. Dans le contexte des observatoires géomagnétiques, ces facteurs semblent importants.

Le terme « absolu » s'entend d'une valeur fixe dans le temps, qui peut être déterminée (en tout temps) et qui, à cet égard, n'est peut-être pas la meilleure à utiliser en géomagnétisme. Le terme suppose également que la mesure soit prise en unités absolues de masse, de longueur et de temps. Les méthodes classiques de Gauss répondaient à cette dernière condition mais, dans le contexte d'un enregistrement de haute résolution, elles n'étaient pas acceptables à cause du temps de mesure. Dans l'optique actuelle, les méthodes d'observation qui ne comportent pas une série complexe de corrections pour tenir compte des variations temporelles constituent la voie la plus sûre pour obtenir des données de référence fiables à l'appui des variomètres. Comme toutes les valeurs du champ géomagnétique qui sont utilisées dans le secteur scientifique sont calculées à partir d'enregistrements de variomètre, il est essentiel que la précision et la stabilité des données des lignes de base soient reconnues comme la raison d'être des mesures absolues.

Les variomètres mesurent normalement les composantes du champ magnétique, de sorte qu'il est important d'établir la valeur « absolue » des directions dans le calcul des données des lignes de base. L'intensité scalaire du champ magnétique peut aussi être déterminée et, pour se faire, l'instrument qui approche le plus un instrument « absolu » est le magnétomètre à protons.

L'AIGA a adopté l'étalon du proton en 1960 (AIGA,1960), reconnaissant ainsi que la précession des protons dans l'eau constitue une mesure absolue de l'intensité du champ en termes d'une constante atomique bien connue. Le rapport gyromagnétique adopté est $2{,}67513 \times 10^8$ radians/tesla.second. La pratique moderne recommande l'utilisation du magnétomètre à protons, H et Z étant obtenus au moyen de bobines, et D étant déterminé à l'aide d'un système d'aimants en suspension ou vannes de flux en position nulle.

Les fréquences des magnétomètres à protons se situent dans la plage de 1 à 3 kHz dans le champ magnétique terrestre et, avec un rapport signal/bruit de 100, il est possible d'approcher la précision ultime de la constante atomique, c'est-à-dire 0,2 nT. Les techniques de traitement des signaux (multiplication fréquentielle synchrone ou portillonnage commandé par microprocesseur) permettraient de réaliser des magnétomètres à protons à lecture directe ayant une résolution de 0,1 ou 0,01 nT. Il faut se rappeler que ces résolutions ne sont pas des précisions absolues.

La précision absolue vraie de toute valeur produite par un magnétomètre à protons dépend:
1. du rapport signal/bruit du signal de l'échantillon de protons;
2. du rapport gyromagnétique réel de l'échantillon (par exemple protons dans l'eau, protons dans la paraffine, etc.);
3. du rapport gyromagnétique utilisé par le fabricant dans la conception des circuits électroniques;
4. de l'étalon de fréquence utilisé dans les circuits de comptage de la fréquence.

L'erreur-type du rapport gyromagnétique protonique est de 3 ppm et restreint la précision de toute mesure géomagnétique unique à une valeur comprise entre 0,1 et 0,2 nT. Pour obtenir et maintenir la précision ultime, il faut que les fréquences utilisées dans les circuits électroniques du magnétomètre aient une précision d'au moins 1 ppm et une stabilité à long et court termes d'au moins 0,1 ppm. Pour tenir compte des phénomènes de dérive dans les cristaux et éliminer les sources d'erreur introduites en cours de fabrication ou à cause de facteurs impondérables,

il est important de vérifier que les fréquences étalons ont ces précisions et souhaitable de les contrôler de temps en temps. Il est utile de comparer entre eux les magnétomètres à protons; cependant

a) deux magnétomètres à protons de construction identique peuvent comporter la même erreur systématique;
b) un écart entre deux magnétomètres à protons n'indique pas lequel est juste ou si aucun des deux ne l'est.

Chaque magnétomètre devrait porter une plaque, de préférence rivetée au boîtier de l'instrument, indiquant les paramètres électroniques critiques (fréquences, facteurs de multiplication, etc.), le nom du fluide utilisé pour un échantillon de protons et le rapport gyromagnétique utilisé dans le modèle. Le rapport gyromagnétique présente des écarts de 10 à 20 ppm selon le fluide utilisé. Les valeurs de référence peuvent comporter des erreurs systématiques de 1 nT ou plus si ces variations ne sont pas prises en compte.

Les anciens systèmes électroniques de comptage inversé comportaient souvent des erreurs systématiques dues à la dérive de la fréquence étalon. Les oscillateurs à fréquence étalon ont été améliorés au point que ce type d'erreur ne devrait pas se produire, mais la dérive dans les boucles de blocage de phase des instruments à lecture directe produit le même effet. Des erreurs de décalage de plusieurs nanoteslas ont été relevées.

En général, la détérioration du rapport signal/bruit se manifeste par des lectures irrégulières et constitue en soi une mesure de la limite de la précision absolue; elle peut aussi donner lieu à une erreur systématique dans les lectures résultantes. La source de bruit indu devrait être examinée parce qu'elle laisse supposer la présence de gradients de champ ou de brouillage RF excessif. Il est alors possible d'obtenir des valeurs aberrantes.

Référence

IAGA
1960: Comptes Rendus de la XII Assemblée Générale de l'UGGI; p. 130, Helsinki.

SPÉCIFICATIONS D'UN VARIOMÈTRE IDÉAL POUR LES APPLICATIONS D'OBSERVATOIRE MAGNÉTIQUE

D. Trigg[1]

On a essayé de prévoir les besoins futurs des chercheurs qui utilisent les données d'observatoires magnétiques. Un instrument conforme aux normes devrait entraîner une amélioration considérable par rapport aux dispositifs actuels d'enregistrement et d'analyse des données relatives au champ magnétique terrestre. La résolution, la stabilité et la réponse en fréquence devraient suffire à fournir un ensemble de données de meilleure qualité que celui qui peut être recueilli à l'aide des instruments actuels.

Une longue discussion s'est tenue sur les attributs d'un variomètre idéal pour observatoire magnétique avant d'aborder les caractéristiques proprement dites. Toutes les personnes présentes sont d'accord pour dire que l'instrument doit être solide mais ont trouvé difficile de quantifier cette caractéristique. On pense à des qualités telles que la résistance aux chocs et la durabilité.

On doit prendre des précautions pour prévenir certains problèmes connus pour provoquer un défaut ou un arrêt de fonctionnement des instruments. Nous avons constaté l'un de ces problèmes au cours de l'atelier: un orage a provoqué des pertes de données. Un bon instrument doit être protégé contre les transitoires dangereux induits par la foudre tant sur ses propres câbles que sur les lignes d'alimentation électrique. De nombreux observatoires sont situés près d'émetteurs radio et un magnétomètre idéal doit donc être protégé contre le brouillage radiofréquence.

Le coût est toujours un problème épineux, et le chiffre de 15 k $ US avancé ci-après ne représente que le prix souhaité, et non une spécification. On peut en dire autant de l'absence de restriction à l'exportation. Un instrument répondant à toutes les exigences ci-après ferait certainement l'objet de restrictions à l'exportation de la part de certains pays.

Un domaine de performance qui n'a recueilli que peut d'attention est la stabilité à long terme, probablement parce qu'il s'est avéré difficile de distinguer les effets de la température et de l'orientation. L'utilisation d'un instrument très stable éviterait d'avoir à procéder fréquemment à des mesures « absolues ».

La section 5 du compte rendu, qui comprend des études comparatives de plusieurs variomètres mis en oeuvre au cours de l'atelier, montre les problèmes posés par les variations de température. Fournir un environnement thermique stable pendant toute l'année coûte cher et l'équipement nécessaire demande toujours un entretien important. Il est beaucoup plus souhaitable que le variomètre lui-même soit insensible aux variations de température de ses composantes électroniques et de ses capteurs.

Aucun des instruments utilisés au cours de l'atelier n'enregistrait les modifications d'orientation verticale et horizontale. Ces mesures angulaires sont considérées comme recommandables. Une modification de l'orientation d'un capteur perpendiculairement à un champ de 60 000 nT donne une erreur d'environ 1 nT pour 3 secondes d'arc. Les composantes les plus modifiées par des phénomènes naturels dépendent de l'emplacement. Aux latitudes élevées, le cycle de gel et de dégel peut déplacer les piliers et les bâtiments. À ces latitudes, les erreurs d'orientation verticale et horizontale se répercutent beaucoup plus sur la composante horizontale du champ que sur sa composante verticale; les erreurs dans le plan horizontal contiennent un terme en Z sin (angle vertical) et, au pire, un terme en H sin (azimut). Par définition, Z n'est pas sujet à des erreurs d'azimut. Au basse latitudes magnétiques, on peut s'attendre à des problèmes de décalage angulaire moins graves du fait de l'absence de cycle de gel et de dégel et parce que le champ a des valeurs plus faibles. À ces latitudes, l'erreur sur Z comporte un terme en H sin (angle vertical) et, au pire, un terme en H sin (azimut).

1 Responsable de la discussion

Sans se laisser effrayer par les considérations précédentes, les participants de l'atelier en sont arrivé à un consensus sur un jeu cohérent de spécifications, énoncé ci-après:

Consensus sur les spécifications
— Variomètre idéal d'observatoire

Solide	
Fiable	MTBF* = 24 mois MTTR* = 1 jour
Protection contre	la foudre l'humidité le brouillage radiofréquence
Puissance	< 100 W alimentation sans coupure
Restrictions à l'exportation	aucune
Coût	< 15 k$ US
Construction des capteurs (3 composantes)	orthogonaux à ±30′, stables à 0,3″/mois et à 0,3″/°C
Résolution	0,1 nT
Plage dynamique	> ± 3 000 nT
Stabilité	0,25 nT/mois
Bande passante	de 0 à 1 Hz à −3 dB,4 pôles
Bruit de fond	0,03 nT de valeur quadratique moyenne dans la bande passante
Linéarité	0,1 % de la pleine échelle
Base de temps	1 s/mois (non basée sur le secteur)
Fréquence d'échantillonnage	10 Hz
Fréquence de mesure	toutes les 5 secondes
Capacité de stockage	6 semaines
Coefficient de température	Tête: < 0,1 nT/°C Console: < 0,1 nT/°C
Plage de température	−20 °C à +50 °C
Enregistrement de la température	± 0,25 °C (toutes les 10 min)
Capteurs d'angle vertical	Résolution: 1 s d'arc (toutes les 10 min) stabilité: 1 s d'arc/mois
Capteurs d'azimut	(comme pour les capteurs d'écart vertical)

* MTBF = temps moyen de fonctionnement sans panne
MTTR = temps moyen de réparation

Les opérateurs des observatoires et les fournisseurs sont invités à remplir la formule de spécifications ci-après et à la faire parvenir à R.L. Coles qui assure la coordination de ces informations. La banque d'informations ainsi recueillie peut être intéressante pour ceux qui établissent de nouveaux observatoires numériques, surtout dans les pays en voie de développement. Les fabricants peuvent également être intéressés à s'en servir comme guide pour l'édition de leurs brochures.

Prière de retourner le formulaire rempli à

Richard Coles
Division de la géophysique
Commission géologique du Canada
1, Place de l'Observatoire
Ottawa, Canada K1A 0Y3

télex: 053317
téléphone: (613) 995-5487

Spécifications — instruments de l'atelier d'observatoires

(Le cas échéant, répondre par oui ou par non, ou par un nombre)

Nom de l'appareil	_____
Type	_____
Fournisseur	_____
Propriétaire/ exploitant	_____
Fiabilité	MTBF _____ (moyenne des tempse fonctionnement sans panne) MTTR _____ (temps moyen de réparation)
Protection contre	la foudre ____ l'humidité ____ le brouillage radiofréquence ____
Puissance	____ W alimentation sans coupure ____
Restrictions à l'exportation	____
Coût	_____ $ US
3 Composantes?	____
Construction des capteurs orthogonaux	à ± ____ min d'arc, stable à ____ s d'arc/ mois, ____ s d'arc/°C
Résolution	____ nT
Plage dynamique	± ____ nT
Stabilité	____ T/mois
Bande passante	de 0 à ____ Hz (à −3 dB), ____ pôles
Bruit de fond	____ nT de valeur quadratique moyenne dans la bande passante
Linéarité	____ % de la pleine échelle
Base de temps	____ s/mois
Fréquence d'échantillonnage	____ Hz
Fréquence de mesure	toutes les ____ secondes
Capacité de stockage	____ semaines
Coefficient de température	Tête: ____ nT/°C Console: ____ nT/°C
Plage de température	____ °C à ____ °C
Enregistrement de la température	Résolution ____ °C.
Capteurs d'angle vertical	Spécif. _____
Capteurs d'azimut	Spécif.: _____
Autres:	_____ _____

Commentaires: _____
_____
_____
_____

ENREGISTREMENT NUMÉRIQUE DES VARIATIONS DU CHAMP MAGNÉTIQUE TERRESTRE DANS LES OBSERVATOIRES FRANÇAIS

Description des équipements et résultats pour la période 1972-1986

J.Bitterly[1], J.M. Cantin[1], J. Burdin[1], R. Schlich[1], J. Folques[1] et D. Gilbert[2]

Résumé

L'enregistrement continu des variations du champ magnétique terrestre dans les observatoires magnétiques français est assuré à l'aide d'un variomètre tri-directionnel à vanne de flux et d'un magnétomètre à protons à précession libre. La résolution du variomètre à vanne de flux est de 0,1 nT, sa stabilité à long terme est meilleure que 1 nT par mois et les dérives d'origine thermique restent inférieures à 0,25 nT/°C. La résolution du magnétomètre à protons associé est de 0,25 nT. Un dispositif d'acquisition numérique à faible consommation (technologie C-MOS) effectue la numérisation et la mise en forme des signaux délivrés par les capteurs. Les informations « champ magnétique » (H, D, Z, F ou X, Y, Z, F) sont enregistrées sur différents supports: bande magnétique, minicassette ou disquette. Un prétraitement des données est effectué en temps réel à l'aide d'un micro-ordinateur associé au dispositif d'enregistrement: l'écart instantané entre les valeurs de champ total calculées à partir des trois éléments (H, D, Z ou X, Y, Z) fournis par le variomètre à vanne de flux et les valeurs données directement par le magnétomètre à protons est inférieur à 1 nT dans 95 % des cas.

Le système décrit fonctionne sans interruption depuis 1972 dans les observatoires magnétiques français de hautes latitudes; il équipe depuis 1979 l'observatoire magnétique national de Chambon-la-Forêt.

Introduction

Le calcul des valeurs instantanées, des valeurs moyennes horaires, mensuelles et annuelles des différents éléments du champ magnétique terrestre, l'analyse des perturbations enregistrées et l'archivage de ces informations constituent la tâche essentielle d'un observatoire magnétique. Pour contrôler et exploiter rapidement les données recueillies, il faut disposer d'un matériel répondant aux critères suivants:

— capteur fiable, à faible consommation, et facile à installer
— acquisition numérique des signaux par un dispositif autonome
— enregistrement magnétique sur un support permettant le traitement direct des données sur ordinateur
— visualisation et test des données en temps réel sur le site de l'observatoire.

Après qu'en 1957 Serson ait décrit une station triaxiale de terrain utilisant des capteurs à vanne de flux, différents systèmes d'observatoires magnétiques semi-automatique ont été développés. En particulier, le laboratoire de géomagnétisme de la Direction de la physique du Globe à Ottawa a réalisé entre 1969 et 1974 plusieurs versions du système connu sous le nom de AMOS (Automatic Magnetic Observatory System) (Andersen, 1969; Trigg et al. 1971; Andersen, 1974, Delaurier et al., 1974). Dans le même temps, l'Institut de Physique du Globe de Paris étudiait un dispositif d'enregistrement numérique des variations du champ magnétique terrestre destiné à remplacer les variomètres à aimants installés dans les observatoires magnétiques français de haute latitude. Le premier exemplaire de ce nouveau dispositif a été installé en 1972 à l'observatoire magnétique de Port aux Français aux îles Kerguelen (Schlich et al., 1974). Les observatoires de Dumont d'Urville (Terre Adélie) en 1973, de Port Alfred (Crozet) en 1974 et de Martin de Viviés (île Amsterdam) en 1980 ont également été équipés de variomètres à vanne de flux. En 1979 un dispositif similaire a été installé à l'observatoire magnétique national de Chambon-la-Forêt; il constitue à présent l'équipement de référence de l'observatoire. Un matériel directement dérivé de cet ensemble a été intégré en 1976 à la station mobile française pour l'enregistrement des données géophysiques (Perrault et al., 1978).

Description et caractéristiques du variomètre triaxial à vanne de flux

Étude des circuits électroniques

Les progrès réalisés à partir de 1970 dans les domaines de la fiabilité, de la stabilité et de la résolution des magnétomètres à vannes de flux nous ont conduit à retenir ce type de capteur directionnel. Pour des raisons de simplicité de mise en oeuvre et d'encombrement nous avions à cette époque écarté les magnétomètres à résonnance nucléaire ou à pompage optique associés à des systèmes de bobines. Entre 1969 et 1971 un variomètre triaxial a été mis au point en collaboration avec la société Thomson Sintra ASM; cette société a construit et commercialisé à partir de 1971 le variomètre type VFO 31 que nous avons adopté. Le capteur est du type « parallèle » à deux noyaux saturés; les principales caractéristiques du variomètre sont données dans la section 3 de ce compte rendu.

Pour obtenir les performances annoncées il a été nécessaire de limiter l'influence des principales causes de défauts affectant généralement le fonctionnement des capteurs à vanne de flux. Pour l'essentiel les défauts d'origine électronique sont liés à l'existence d'une erreur de sonde (la sonde placée dans un champ nul délivre un signal résiduel), à l'instabilité du courant de compensation et à l'inhomogénéité du champ compensé. L'influence de ces différents paramètres sur le fonctionnement des capteurs à deux noyaux saturés a été analysé en détail par Primdahl (1979). Pour ce qui concerne le variomètre VFO 31 cette analyse a été reprise par Bitterly et Cantin (1979) dans un rapport interne de l'Institut de Physique du Globe de Paris.

1 Institut de Physique du Globe de Strasbourg
2 Institut de Physique du Globe de Paris

Nous rappelons ci-dessous les solutions retenues lors de la mise au point des circuits du VFO 31:

— Circuit générateur du courant de compensation: la stabilité du courant de compensation dépend essentiellement de la stabilité de la référence tension; il convient de sélectionner des diodes ayant un coefficient de température meilleur que 2 ppm/°C. Les amplificateurs utilisés pour le générateur de courant doivent avoir une dérive inférieure à un microvolt/°C.

— Circuits excitation et amplification-détection: au niveau de l'électronique associée au capteur l'apparition d'un signal d'erreur peut être due à:

1. la variation du signal d'excitation (effet de l'ordre de 1nT pour une variation de 1mA p.p. du courant d'excitation et pour un champ compensé de 100 000 nT);

2. la variation de phase, liée à la température, de l'amplificateur sélectif ou du détecteur de phase 2F par rapport au signal d'excitation F. Les circuits mis au point lors des essais du variomètre VFO 31 ont permis de limiter l'ensemble de ces effets à moins de 0,15 nT/°C pour un champ compensé de 100 000 nT. Il a été nécessaire de réduire le niveau de l'harmonique 2 contenu dans le signal d'excitation en dessous de 75 dB; dans ces conditions l'erreur de sonde est de l'ordre de quelques nT et reste stable au cours du temps.

Pour les magnétomètres à deux noyaux saturés fonctionnant en champ compensé on observe en plus de l'onde 2F liée au champ à mesurer la présence d'une onde 2F en quadrature due en particulier à l'inhomogénéité du champ compensé. L'amplitude de ce signal 2F en quadrature est à la fois proportionnelle au niveau du courant d'excitation et à l'intensité du champ compensé. Si le champ de compensation n'est pas homogène les variations de phase de l'amplificateur sélectif ou du détecteur de phase par rapport au signal d'excitation entraînent la démodulation de cette onde 2F en quadrature et créent donc un signal d'erreur. Pour les sondes utilisées l'amplitude de ce signal d'erreur est de l'ordre de 1 nT par degré d'angle de variation de phase de l'amplificateur sélectif ou du détecteur de phase pour un champ compensé de 100 000 nT et un courant d'excitation de 120 mA p.p. Ces défaults ont été éliminés en réalisant d'une part un circuit d'excitation dont le niveau du signal est constant et d'autre part des circuits amplificateur sélectif et détecteur de phase ayant une bonne stabilité en température. Les caractéristiques géométriques du bobinage de compensation ont été optimisées pour obtenir un champ compensé aussi stable et homogène que possible.

Études des dérives d'origine thermique

L'étude de la stabilité thermique d'un variomètre et la détermination expérimental des coefficients de température des différentes parties du montage sont réalisées simplement en utilisant deux magnétomètres VFO31 dont les sorties sont câblées en opposition. Ce montage d'essai différentiel permet de s'affranchir des variations naturelles du champ magnétique; l'un des capteurs est choisi comme référence tandis que l'autre est soumis, en totalité ou en partie, à des variations thermiques contrôlées d'amplitude voisine de 40 °C. L'amplitude des dérives d'origine thermique dépend de la stabilité mécanique du capteur: un soin particulier a été apporté au choix des matériaux et à la réalisation mécanique de l'ensemble sondes-support triaxial. Les meilleurs résultats ont été obtenues en utilisant le CER-VIT, céramique vitreuse fabriquée par la société Owens Illinois Inc., pour la réalisation du support et en usinant dans un bloc de quartz le mandrin recevant les noyaux perméables et servant de support au solénoïde de compensation. Ces matériaux ayant un coefficient de dilatation de l'ordre de 5×10^{-8} permettent de réaliser un capteur peu sensible aux déformations d'origine thermique.

Pour des raisons de commodité on a déterminé séparément les coefficients de température des différentes parties du montage, c'est-à-dire le capteur proprement dit, l'électronique associée et les circuits de compensation. La figure 7.1 illustre les résultats obtenus pour plusieurs cycles chauffage-refroidissement. La bonne reproducibilité des courbes d'un cycle à l'autre, ainsi qu'une reprise de point meilleure que 1 nT pour le signal différentiel observé en fin de cycle confirment que les coefficients déterminés sont significatifs. Les résultats obtenus sont donnés dans le tableau 7.1; ils permettent d'affirmer que les effets cumulés des variations de température sont toujours inférieurs à 0,25 nT/°C pour un champ compensé de 50 000 nT.

Étude du bruit

Le bruit du variomètre VFO31 est pour l'essentiel attribué à la sonde: en effet la puissance spectrale de bruit des circuits électroniques est inférieur à 25 pT^2Hz^{-1} dans la bande considérée. Les mesures de bruit ont été effectuées pour une sonde élémentaire placées dans un blindage en mumétal ayant un coefficient d'atténuation des variations du champ ambiant de l'ordre de 200. Le spectre de puissance de bruit d'une sonde est représenté à figure 7.2; il a été calculé suivant une méthode proche de celle adoptée par Candidi et al. (1974). L'allure générale de ce spectre, dans la bande 0,0025 à 1 Hz est voisine des résultats donnés par Snare et McPherron (1973); la puissance spectrale de bruit, calculée à 100 s, est de 900 pT^2Hz^{-1}. On peut estimer que le bruit global du variomètre reste inférieur à 0,1 nT p.p. de 0 à 1 Hz.

Le magnétomètre à protons à précession libre

Il est classique d'associer à un capteur triaxial, un magnétomètre à protons à précession libre qui fournit la valeur de l'intensité du champ total; cette information redondante permet des tests de contrôle des données échantillonnées (X,Y,Z, ou H,D,Z). Cette configuration a été adoptée, et un magnétomètre à protons (Géometrics G816 ou Elsec 770) complète le dispositif. Ce magnétomètre a été spécialement transformé et adapté pour obtenir une résolution de 0,25 nT et pour fonctionner suivant un protocole de commande à distance. Un câble coaxial assure l'alimentation, permet le déclenchement de la mesure et transmet le train d'impulsion correspondant à cette mesure (le nombre d'impulsions transmises correspond à la valeur du champ total exprimé en 1/4 de nT). La sonde du magnétomètre à protons est munie d'un blindage limitant les effets des parasites d'origine radioélectrique.

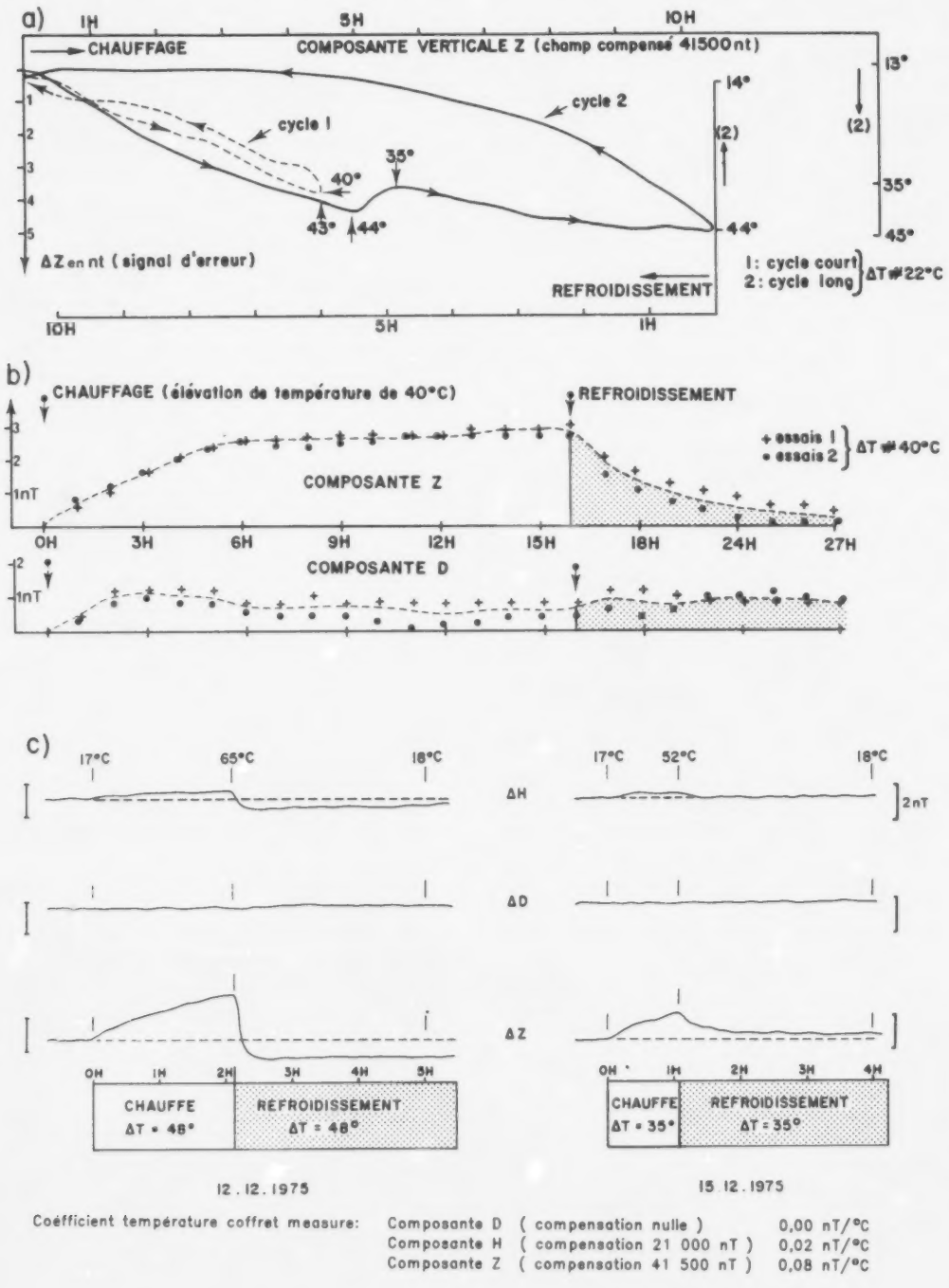


Figure 7.1 Tests de calibration de la température pour le magnétomètre VFO 31.

Tableau 7.1 Résumé des coefficients de température en nT/°C

	Variomètre					
Capteur	A101	A102	CSF1	CSF2	CSF3	CSF4
Composante D	.05 ± .03	.03 ± .02	.04 ± .02	.06 ± .03	.06 ± .03	.05 ± .02
Composante H	.07 ± .03	.02 ± .02	.04 ± .03	.08 ± .04	.08 ± .02	.06 ± .02
Composante Z	.04 ± .04	.05 ± .02	.07 ± .04	.12 ± .05	.17 ± .04	.10 ± .03
Électronique						
Composante D	.02 ± .01	.02 ± .01	.04 ± .02	.02 ± .02	.01 ± .005.	005 ± .001
Composante H	.04 ± .02	.03 ± .02	.03 ± .02	.08 ± .08	.02 ± .01	.015 ± .008
Composante Z	.07 ± .03	.05 ± .02	.03 ± .02	.08 ± .05	.05 ± .01	.013 ± .005

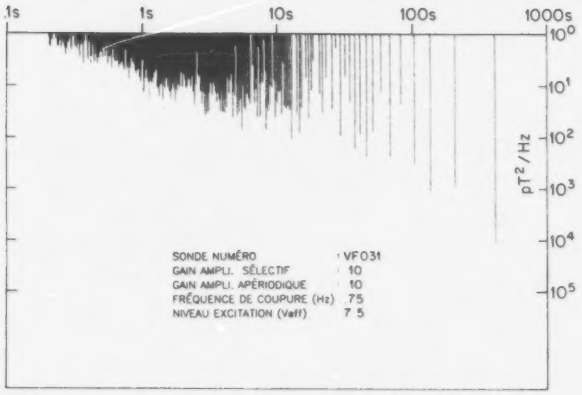


Figure 7.2 Densité spectrale du bruit pour le magnétomètre VFO 31.

Dispositif d'enregistrement numérique

Le variomètre à vanne de flux (capteur et électronique associée) et le magnétomètre à protons sont installés dans un abri amagnétique régulé en température: l'amplitude des variations thermiques à l'intérieur de l'abri est inférieure à 2°C. Le dispositif d'acquisition numérique et les enregistreurs sont installés dans un local pouvant être éloigné des capteurs de plusieurs centaines de mètres.

Un dispositif d'acquisition, étudié et construit en 1971 par le Service des Observatoires Magnétiques de l'Institut de Physique du Globe de Paris (Bitterly et al. 1976), reçoit les signaux délivrés par le variomètre triaxial et par le magnétomètre à protons. Ce matériel utilise la technologie CMOS, l'autonomie de fonctionnement de l'ensemble capteur-dispositif d'acquisition est supérieure à 12 heures (batterie 12 V, 4 Ah). Ce dispositif d'acquisition numérique a pour principales fonctions:

— la génération des informations de temps
— le multiplexage des signaux analogiques (H,D,Z)
— la conversion analogique/numérique de ces signaux
— la mise en forme d'enregistrement de ces signaux
— le déclenchement de la mesure du champ total F et la transmission du train d'impulsions correspondant à la mesure
— la mise en forme d'enregistrement de l'ensemble des informations numériques (codage Décimal Codé Binaire)
— la génération des signaux de commande de l'enregistreur magnétique incrémental ou des enregistreurs minicassettes

Le variomètre à vanne de flux fournit, pour chaque composante, une tension proportionnelle aux variations du champ à mesurer. Cette tension est transformée en information numérique par un convertisseur « double rampe » qui délivre un train d'impulsions. Le nombre de ces impulsions est égal à la valeur du champ à mesurer exprimée en 1/10 de nT. Le magnétomètre à protons est déclenché par une commande générée par le dispositif d'acquisition numérique à la fin de chaque échantillonnage X,Y,Z ou H,D,Z.

Le train d'impulsion provenant du convertisseur analogique/numérique, ou du magnétomètre à protons est compté et mémorisé dans le compteur de mesure. Le sérialiseur reçoit simultanément l'ensemble des informations numériques des compteurs jour, heure, mesure. Il délivre, pour chaque mesure, successivement et au rythme de 100 Hz les caractères à enregistrer en codage Décimal Codé Binaire. Un coffret de commande et de contrôle effectue la liaison entre le dispositif d'acquisition numérique et le dérouleur de bande magnétique à défilement continu (9 pistes, 800 bpi). Ce coffret comporte un microprocesseur 8 bits et une mémoire de 16K octets assurant une autonomie de vingt heures. Une imprimante permet de visualiser les messages de contrôle ou d'erreur (fontionnement permanent en mode « journal »). Les informations « champ magnétique » sont enregistrées séquentiellement dans l'ordre H,D,Z, et F. Toutes les vingt minutes, ces informations sont complétées par l'indicatif de l'observatoire, la date et l'heure. La précision du temps est de l'ordre de 0,5 seconde.

Un micro ordinateur 32 K et une unité de disques souples complètent la chaine de mesure. Il est ainsi possible d'effectuer en temps réel, un test de vérification de la cohérence entre les valeurs instantannées Fi* du champ total reconstitué à partir de trois éléments (X,Y,Z ou H,D,Z) et les valeurs Fi de champ total mesurées à l'aide du magnétomètre à protons. Pratiquement on calcule chaque minute la différence dFi = Fi* − Fi; pour chaque groupe de 20 mesures on calcule la valeur moyenne dFi et l'écart-type E correspondant. Le critère de cohérence adopté est exprimé par la relation

$$(dFi - dF\ moyen) < 2E.$$

Les valeurs ne satisfaisant pas à ce critère sont tabulées. Les caractéristiques du dispositif d'acquisition numérique sont résumées dans le tableau 7.2; le synoptique de la chaîne de mesure complète est présenté sur la figure 7.3. L'ensemble du système à été présenté à la XVIIème

Tableau 7.2 Observatoires magnétiques français de hautes latitudes.

Dumont d'Urville (Terre Adélie)	DUM	66°40'S,	140°01'E	75.6°S,	230.9°E	1973
Port-aux-Français (Kerguelen)	KGL	49°21'S,	70°12'E	56.5°S,	127.8°E	1972
Port Alfred (Crozet)	CZT	46°28'S,	51°52'E	51.2°S,	109.4°E	1974
Martin de Vivies (Île Amsterdam)	AMS	37°59'S,	77°34'S	46.5°S,	141.3°E	1980

Le fonctionnement des observatoires magnétiques français de haute latitudes est pris en charge par le Territoire des Terres Australes et Antarctiques Françaises. Ces observatoires sont placés sous la responsabilité scientifique de l'Institut de Physique du Globe de Strasbourg.

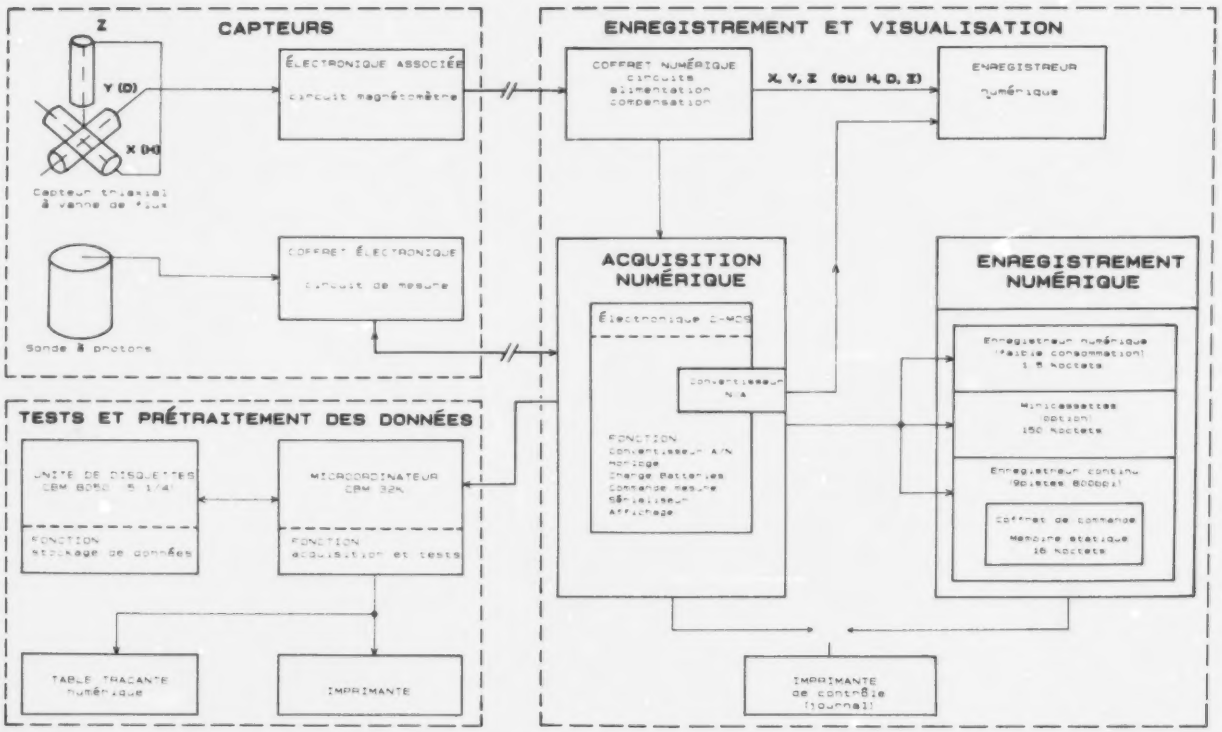


Figure 7.3 Schéma blocs du système d'observation magnétique digitale IPG.

Assemblée générale de l'UGGI à Canberra (Bitterly et al., 1979). Différents auteurs ont décrit des systèmes de ce type à faible consommation (Trigg, 1975; Medford et al., 1981).

Principaux résultats d'exploitation pour les périodes 1972-1986.

Estimation de la stabilité à long terme

L'analyse des valeurs calculées dans chaque observatoire pour les lignes de base du variomètre triaxial permet d'estimer sa stabilité. L'origine des dérives à long terme peut être d'ordre mécanique (instabilité du support triaxial par exemple) ou d'ordre électronique (variation de l'erreur de sonde, évolution de la référence tension). Dans notre cas la part des dérives d'origine mécaniques peut être considérée comme très faible ainsi que le prouvent les valeurs de base calculées pour 304 mesures de la déclinaison effectuées entre mars 1985 et novembre 1986, à l'Observatoire de Chambon la Forêt.

Valeur moyenne de D: Do = − 3° 43′ 34″ écart type = 7″
Valeurs extrêmes (maximum) = − 3° 43′ 16″ (maximum)
(minimum) = − 3° 43′ 49″ (maximum)

L'histogramme de la figure 7.4 représente la distribution des écarts à la valeur moyenne Do. Durant cette période le taux moyen d'évolution des valeurs de base Do en fonction du temps est toujours resté inférieur à 15 seconde par mois. Ce résultat est confirmé par l'analyse de 13 années de fonctionnement continu du capteur VFO 31 installé en 1972 à l'Observatoire de Port aux Français (références: Fascicules « Observations Magnétiques faites à l'Observatoire de Port aux Français, publiés par l'Institut de Physique du Globe de Paris (1972-1979) et par l'Institut de Physique du Globe de Strasbourg depuis 1980). Voir aussi le tableau 7.2.

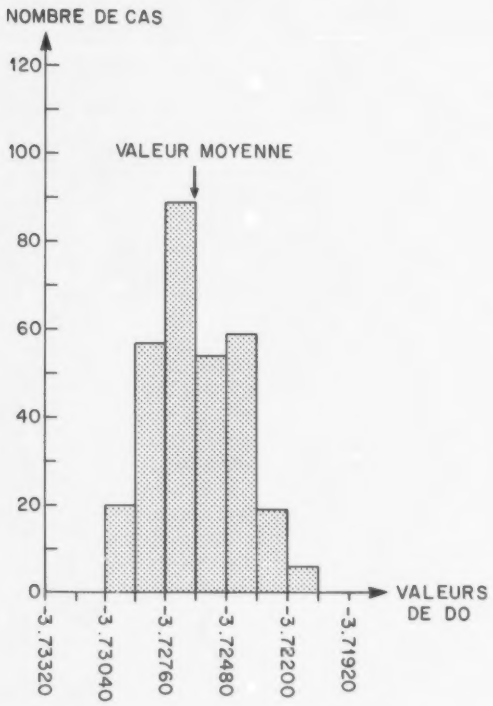


Figure 7.4 Histogramme des valeurs de la déclinaison pour l'observatoire Chambon la Forêt.

Pour les composantes H et Z nous savons que la stabilité à long terme des valeurs de base Ho et Zo correspondant au zéro électrique du capteur dépend principalement des caractéristiques (homogénéité, stabilité) du champ de compensation créé pour annuler la partie principale du champ magnétique terrestre suivant l'axe de la sonde. À Chambon la Forêt pour la période de mars 1985 à novembre 1986 (280 séries de mesures) on obtient:

Valeur moyenne de H: Ho = 20883,1 nT, écart type: 1,4 nT
Valeurs extrêmes minimum = 20879,5
maximum = 20885,0
Valeur moyenne de Z: Zo = 42097,4 nT, écart type: 0,9 nT
Valeurs extrêmes minimum = 42095,4
maximum = 42099,9

On note l'existence d'une faible variation saisonnière des valeurs de base Ho et Zo dont le taux peut atteindre 1,5 nT/mois. L'amplitude annuelle de la variation thermique dans la cave des variomètres est de l'ordre de 5°C. Il reste qu'il est difficile de distinguer la part respective des différentes causes électroniques provoquant cette évolution.

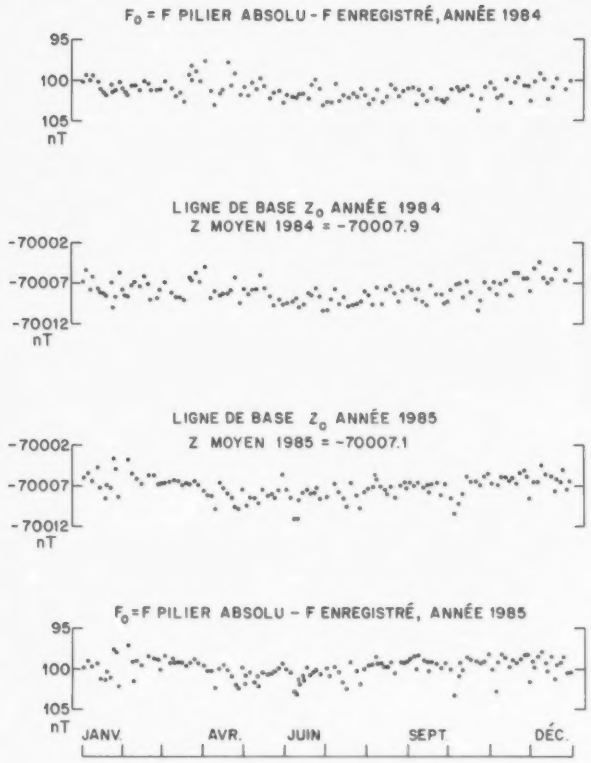


Figure 7.5 Valeurs des lignes de base pour le variomètre triaxial Dumont d'Urville en 1984 et 1985.

Pour illustrer et quantifier de façon plus précise la notion de stabilité à long terme du variomètre VFO31 nous avons choisi d'analyser les valeurs de base obtenues pour la composante verticale, durant les années 1984 (119 mesures) et 1985 (136 mesures) à l'Observatoire de Dumont d'Urville en Terre Adélie. À cet Observatoire, situé à 160 km du pôle sud magnétique de surface, la valeur de la composante Z est très proche de la valeur du champ total.

Les valeurs annuelles en 1985 sont:

Z = −69873 nT
F = 69886 nT
X = −1288 nT
Y = −445 nT

La figure 7.5 représente les valeurs calculées respectivement pour Zo et pour la différence du champ total existant entre l'abri des variomètres et le pilier de mesures absolues, valeur appelée Fo. On note que la valeur moyenne de Zo en 1984 (−70007,1 nT) est identique à 1 nT près à la valeur moyenne de Zo en 1985 (−70007,9 nT); l'écart-type étant égal à 1.4 nT pour ces deux anneés consécutives. Ces résultats et l'étroite corrélation observée entre les fluctuations résiduelles de Zo et celles de Fo (magnétomètre à protons de référence) attestent de la remarquable stabilité du variomètre VFO 31. En conclusion on peut affirmer que dans tous les cas, cette stabilité à long terme est meilleure que 1 nT/mois.

Taux de pannes.

Depuis 1972 le taux moyen des pannes des dispositifs installés dans les observatoires magnétiques français peut être chiffré à:

— une panne pour trois ans pour le variomètre à vanne de flux;

— deux pannes par an pour le dispositif d'acquisition numérique. Le pourcentage des données numériques manquantes pour une année est toujours resté inférieur à 0,6 %.

Précision des valeurs de champ calculées.

Une estimation globale de la précision des valeurs instantannées calculées à partir des données fournies par le variomètre VFO31 peut être déduite de la comparaison de la valeur du champ total calculée à partir des 3 éléments (H,D,Z ou X,Y,Z fournis par le variomètre à vanne de flux) avec la valeur mesurée directement par le magnétomètre à protons associé. Cette comparaison est effectuée systématiquement depuis 1974 dans les observatoires français austraux. L'écart correspondant à ces déterminations est inférieur à 1 nT dans 95 % des cas; moins de 2 % des écarts calculés sont supérieurs à 2,5 nT.

Conclusion

Les installations décrites fonctionnent sans interruption ni incident notable dans les observatoires magnétiques français depuis 1972. Le choix retenu à l'époque pour les capteurs (variomètre à vanne de flux et magnétomètre à protons associés) est incontestablement justifié pour l'équipement d'un observatoire magnétique compte tenu de la simplicité de mise en oeuvre, de la fiabilité et des performances obtenues. Les développements récents dans le domaine des microprocesseurs et des micro-ordinateurs compatibles conduisent à proposer une nouvelle génération d'observatoires magnétiques automatiques.

Bibliographie

Andersen F.
1969: An Automatic Magnetic Observatory (abstract); AIGA Bulletin n° 26, p. 106.
1974: An automatic observatory system; Direction de la physique du Globe, Énergie, Mines et Ressources, Ottawa, Canada, v. 44, n° 11, p. 249-259.

Bitterly, J., Cantin, J.M. et Schlich, R.
1976: Enregistrement numérique des variations lentes du champ magnétique terrestre. Communication présentée à la table ronde sur les équipements de mesure des champs magnétiques et électriques; Garchy, 17-18 mars 1976. Rapport CRG/CAPT/03/1976, p. 13.

Bitterly, J., Cantin, J.M.
1979: Les magnétomètres « Fluxgate« ; Communication présentée à la journée d'Étude sur les capteurs magnétiques, Einsieg-Steen, Grenoble, novembre 1979. Rapport CEPHAG n° 18/80, p. 42-46.

Candidi, M, Orfei, R., Palutan, F. et Vannaroni, G.
1974: FFT analysis of a space magnetometer noise; IEEE Transactions on Geoscience Electronics (USA), GE12, p. 22-28.

Delaurier, J.M., Loomer, E.I., Jansen van Beek, G. et Nandi, A.
1974: Editing and evaluating digitally recorded geomagnetic components at canadian obsevatories; Direction de la physique du Globe, Énergie, Mines et Ressources, Ottawa, Canada, v. 44, n° 9, p. 235-242.

Medford, L.V., MacLennan, C.G., Rosenfeld, P.E., Lanzerotti, L.J. et Acuna, M.H.
1981: Low-Power portable data acquisition system and its use in geomagnetic measurements. IEEE Transactions on Geoscience Electronics, v. GE-19, n° 3, p. 122-128.

Perrault, S. et al.
1978: French Mobile Station for recording geophysical data: description, initial results of the conjugated campaign in association with GEOS-1; ESA SP-135, June 1978, p. 73-83.

Schlich, R., Bitterly, J., Benzoni, A. et Halleguen, P.
1974: Observations magnétiques faites à l'observatoire de Port-aux-Français (Kerguelen), 1972; Fascicule de l'Institut de Physique du Globe de Paris, p. 1-53.

Serson, P.H.
1957: An electrical recording magnetometer; Canadian Journal of Physics, v. 35, p. 1387-1394.

Snare, R.C., et McPherron, R.L.
1973: Measurement of instrument noise spectra at frequencies below 1 Hertz; IEEE Transactions on Magnetics, MAG-9, n° 3, p. 232-235.

Trigg, D.F.
1975: A high-capacity low power data logger; Direction de la Physique du Globe, Énergie, Mines et Ressources, Ottawa, Canada, séries géomagnétique n° 1, p. 1-11.

Trigg, D.F., Serson, P.H. et Camfield, P.A.
1971: A solid-state electrical recording magnetometer. Direction de la Physique du Globe, Énergie, Mines et Ressources, Ottawa, Canada, v. 41, n° 5, p. 67-80.

8. CONCLUSIONS

Le but principal de l'atelier de travail concernait le fonctionnement de divers instruments à un endroit donné pendant une période de temps déterminée. Pendant la dizaine de jours qu'a duré l'atelier, ce cadre de travail a été largement dépassé. Des échanges de points de vue ont eu lieu sur toutes sortes de sujets directement ou indirectement liés à l'objectif principal. La vaste gamme de thèmes abordés reflète les problèmes spécifiques qui se posent à chacun des participants présents. Les ingénieurs voulaient définir les fonctions de l'observatoire en termes techniques. Les fabricants de matériel voulaient soulever les questions de production et d'essais. Les observateurs se préoccupaient de précision et de reproductibilité. Les administrateurs se souciaient de main d'oeuvre et de formation.

La plupart de ces sujets ne sont pas abordés lors des réunions internationales habituelles et c'est pour cette raison que l'atelier de travail est considéré par tous les participants comme un énorme succès. C'est pour cette raison aussi que la plupart des participants recommandent la tenue d'autres ateliers de travail consacrés généralement à des aspects encore plus spécifiques du côté instrumental et technique du géomagnétisme fondamental. Tout le monde semble d'accord pour que se tienne un autre atelier général d'ici 4 ou 6 ans, mais aussi pour qu'un atelier consacré à la saisie, au traitement et à la présentation des données ait lieu dans les deux ou trois ans à venir.

En général, la structure ouverte des réunions a véritablement permis d'exploiter les compétences présentes et d'encourager les participants à approfondir des problèmes ou des opinions. Elle a aussi permis d'examiner les problèmes courants soulevés par les expériences en cours. Certains sujets auraient été mieux traités dans une structure plus officielle avec, peut-être, un exposé par un spécialiste invité suivi d'une discussion sur certains aspects plus spécifiques du problème. Maintenant, il apparaît que des conférences initiales sur les principes physiques des capteurs et sur les caractéristiques pratiques de leur fonctionnement auraient facilité les discussions sur les tendances actuelles ou futures ainsi que l'établissement de recommandations. Il est très clair que l'institution qui accueille l'atelier a beaucoup à faire à cet égard. Une des leçons d'Ottawa est que l'institut qui reçoit un atelier de travail effectue autant de travail que tous les autres participants réunis, non seulement pour offrir les installations et l'aide technique nécessaires, mais aussi pour traiter les problèmes qui peuvent être choisis par les membres de cet institut ou soulevés par des participants, et pour définir les avantages et les inconvénients des instruments utilisés.

La Division de la géophysique de la Commission géologique du Canada a réalisé un travail admirable, qu'il s'agisse des installations et de la main d'oeuvre offertes à tous les niveaux de travail de l'atelier ou de l'organisation domestique. La contribution du personnel de la division aux discussions a été essentielle. La CGC a beaucoup appris de cet atelier, un point que les futurs hôtes ne doivent pas négliger, et elle a énormément profité des efforts intenses déployés par son personnel avant, pendant et après la réunion. Avant d'accueillir l'atelier, il a fallu préparer le site pour installer de nombreux instruments, le courant électrique, des abris et des pièces mécaniques de toutes sortes. Il a fallu aussi prévoir un laboratoire d'informatique pour créer des fichiers de données communs permettant de comparer les données recueillies par divers enregistreurs sur divers supports et dans divers formats. Il était impossible d'anticiper tous les problèmes et le succès de l'atelier reposait entièrement sur la capacité et la bonne volonté du personnel de la CGC à s'adapter rapidement et complaisamment à toutes les situations.

Les observateurs forment une communauté très isolée. En général, ils n'assistent pas aux réunions de l'AIGA et peu de chercheurs de l'AIGA s'intéressent au travail d'observation ou acceptent des responsabilités dans ce domaine. Il aurait été bon qu'un ou deux chercheurs supplémentaires assistent à l'atelier pour parler des applications du travail d'observation. L'atelier a beaucoup mieux réussi à attirer les observateurs. Si cela est vrai, des ateliers de travail devraient être organisé régulièrement. L'isolement ressenti par les observateurs qui n'ont pratiquement pas accès aux réunions de l'AIGA a été exprimé très fortement, ainsi que leur sentiment que l'AIGA ne leur fournit pas assez de conseils ou d'aide matérielle.

Sur le front commercial, la réunion a mis en relief l'intérêt d'une communication entre les utilisateurs et les fabricants. Au début, chaque groupe semblait penser que ses exigences ou ses contraintes étaient incompatibles avec celles de l'autre groupe. A la fin, il était clair que même les aspirations idéalisées des observateurs étaient réalisables grâce aux instruments modernes disponibles dans le commerce, et ce à un coût raisonnable. Il est aussi apparu que les observateurs (et ceux qui effectuent des expériences en géomagnétisme) représentaient un marché important pour les capteurs et le matériel d'enregistrement et de traitement des données.

On a pu observer un fossé entre la génération des anciens observateurs qui ont de nombreuses années d'expérience avec les théodolites et les instruments absolus, et celle des jeunes observateurs qui, bien que compétents, en sont encore à apprendre ou à réinventer des techniques. Dans la plupart des pays, les observateurs appartiennent à l'une ou l'autre de ces catégories, mais pas aux deux. L'atelier les a tous rassemblés, au grand bénéfice de chacun. On a aussi pu observer un fossé entre ceux qui utilisent les instruments absolus classiques et ceux qui utilisent les magnétomètres à vanne de flux. Les deux écoles de pensée ont bénéficié des échanges de points de vue qui ont eu lieu.

Après un regard en arrière, le personnel de la Division de la géophysique a tiré quelques conclusions au sujet des possibilités d'améliorer l'atelier de travail.

1. Il est certain qu'un Comité du programme est nécessaire et qu'il doit rassembler des membres de tous les pays. Toutefois, le travail de préparation, y compris la détermination des problèmes scientifiques qui seront examinés lors de l'atelier, repose entièrement sur les organisateurs locaux.
2. Il est impossible d'anticiper complètement le travail expérimental ou les discussions scientifiques (par exemple, il y a eu une concentration imprévue sur les observations absolues de la part des européens).

3. Une plus grande discipline est nécessaire en ce qui concerne l'utilisation des instruments. Certains jours, il ne faut pas toucher aux instruments. Tous les réglages doivent être notifiés et expliqués. Un ou deux jours doivent être réservés pour l'installation et la manipulation des instruments ainsi que pour laisser aux participants le temps de concevoir des expériences ad hoc. Ces idées doivent être adoptées seulement après une discussion libre, à un moment déterminé.
4. Il faut 2 ou 3 jours pour que les instruments soient prêts à fonctionner. L'atelier doit donc commencer un lundi pour que les participants aient toute l'aide technique nécessaire.
5. La température de toutes les salles doit être monitorée, ainsi que celle des capteurs et de tous les appareils électroniques susceptibles de posséder un coefficient thermique relatif.
6. Les équipements absolus doivent être traités avec le même respect que dans les conditions normales.
7. L'organisme qui accueille l'atelier doit autoriser un nombre limité de formats pour les données. Il serait même souhaitable d'imposer un seul format standard car il est plus facile pour chaque concepteur de traduire ses données que pour l'organisateur de faire toutes les transformations. L'AIGA devrait envisager d'établir des directives relatives à un tel format standard pour les organismes qui désireraient changer leur matériel informatique.
8. Tous les représentants des intérêts scientifiques et commerciaux doivent annoncer très tôt leur participation à l'atelier pour maximaliser les chances de succès en ce qui concerne la conduite des expériences et la gestion des données.

En conclusion, Ottawa était un site idéal pour ce premier atelier de travail, non seulement à cause du nombre de bâtiments magnétiquement propres, mais aussi en raison de la proximité des ateliers, des bureaux et des salles de réunion. Un laboratoire d'informatique exclusif (avec des périphériques) était aussi disponible ainsi que tout le personnel (scientifique, technique et de soutien) nécessaire pour l'organisation, la direction et la tenue quotidienne de l'atelier. Ces exigences sont pratiquement minimales et tout organisme désireux d'accueillir un futur atelier devrait comparer ces capacités à celles de la Division de la géophysique de la CGC. Il serait bon aussi qu'il demande conseil au personnel de la CGC.

W.F. Stuart

APPENDICE 1

Bibliographie des magnétomètres

Cette bibliographie est la plus récente de la série et ne comporte pas les références déjà mentionnées dans les éditions précédentes.

Primdahl, F.
1970: Bibliography of fluxgate magnetometers; Publications of the Earth Physics Branch, Ottawa, v. 41, no. 2.

Serson, P.H., et F. Primdahl
1972: Bibliography of magnetometers; Publications of the Earth Physics Branch, Ottawa, v. 43, no. 8.

La bibliographie a pris naissance à partir d'une, préparée par Fritz Primdahl de l'Institut de recherche spatial Danois. Des copies de cette bibliographie étaient disponibles à l'atelier d'Ottawa et il fut suggéré qu'il serait utile de l'inclure au compte rendu. Avec la consultation de gens de l'atelier, nous avons ajouté quelques références sur, par exemple: les magnétomètres à précession de protons et sur les théodolites à vanne de flux D & I. Toutefois, la majorité des références a été recueillie par Fritz Primdahl et nous voudrions le remercier.

R.L. Coles

Abadeer, W. W. et Ellis, D. M.
1971: Magnetic field detection using coherent magnetization rotation in thin magnetic film; Journal of Applied Physics, v. 42, p. 1439-1440.

Acuna, M. H.
1974: Fluxgate magnetometers for outer planets exploration; IEEE Transactions on Magnetics, MAG-10, p. 519-523.
1980: The MAGSAT precision vector magnetometer; Johns Hopkins APL Technical Digest, v. 1, p. 210-213.
1981: MAGSAT — vector magnetometer absolute sensor alignment determination; NASA Technical Memorandum 79648, Goddard Space Flight Center, Greenbelt, Maryland 20771, U.S.A.

Acuna, M. H. et Ness, N. F.
1975: The Pioneer XI High Field Fluxgate Magnetometer; Space Science Instrumentation, (Netherlands), v.1, No. 2., p. 177-188.

Acuna, M. H., Scearce, C. S., Seek, J. B.,et Scheifele, J.
1981: The MAGSAT vector magnetometer — a precision fluxgate magnetometer for the measurement of the geomagnetic field; NASA Technical Memorandum 79656, Goddard Space Flight Center, Maryland, 20771, U.S.A.

Adams, D. F., et al.
1976: Vector magnetometer design study of a triaxial fluxgate sensor design demonstrates that all MAGSAT vector magnetometer specifications can be met; Final Report, N77-13390, Ball Brothers Research Corporation, Aerospace Division, Time-Zero Laboratories, 1488 W. 178th st., Gardena, CA90247, U.S.A.,173 p.

Afanasenko, M. P., Berkman, R. J., Bondaruk, B. L. et Itchkovich, A. B.
1974: Multiple component magnetic field intensity meter with a ring ferromagnetic probe; Otbor i Peredacha Informatsii (USSR), No. 41, p. 92-98.

Afanasiev, J. V.
1984: Calculation of maximum field strength for ferroprobe excitation; Measurement Techniques (Transl. from Russian); v. 27, p. 551-554, Plenum.

Afanasiev, J. V., et Bushuev, L. J.
1978: Three component ferroprobe; Pribori I Sistemi Upravlenia, no. 1, p. 29-31, (In Russian).

Alex, T. K.
1977: High precision magnetometer using COS MOS circuits; Electronic Engineering, v. 49, p. 27-28.

Andersen, F.
1973: Telephone verification system for automatic magnetic observatories; Publications of the Earth Physics Branch, v.44, no. 5.
1974: An automatic magnetic observatory system; Publications of the Earth Physics Branch, v. 44, no. 11.

As, J. A.
1973: The compensation method for measuring the components of the Earth's magnetic field; Zeitschrift fur Geophysik, v. 39, p. 303-311.

Auster, V.
1984: Geomagnetic absolute measurements with a nuclear resonance theodolite at the Adolf Schmidt Observatory in Niemegk; Geophysical Surveys, v. 6, p. 269-270

Barker, R. C.
1965: On the analysis of second-harmonic modulators; IEEE Transactions on Magnetics, MAG-1, p. 337-341.

Behannon, K. W., Acuna, M. H., Burlaga, L. F., Lepping, R. P., Ness, N. F. et Neubauer, F. M.
1977: Magnetic field experiment for Voyager 1 and 2; Space Science Reviews, v. 21, p. 235-257.

Bell, M. E.
1979: 3 axis fluxgate magnetometer sensor; Canadian Patent Application, Filed on or about Jan. 9/79, File No. 265-6950-2. Canada Patents and Developments Ltd., 275 Slater Street, Ottawa, Canada, K1A OR3.

Bergmark, T.
1984: Experience of geomagnetic field recording with a fluxgate magnetometer having a bridge sensor; Geophysical Surveys, v. 6, p. 381-391.

Berkman, R. J., and Sinitskii, L. A.
1962: On the maximum possible gain of a magnetic modulator having an output at twice the frequency, and means of realizing it; Automatika i Telemekhanika, v. 23, p. 1385-1392.

Berkman, R. J., et al.
1972: The ferroresonant excitation regime for magnetic modulators and ferroprobes; Geofizicheskaya Apparatura, (U.S.S.R.), no. 50, p. 20-28.

Bittel, H.
1969: Noise of ferromagnetic materials; IEEE Transactions on Magnetics; MAG-5, p. 359-365.

Bitterly, J., Cantin, J. M., Schlich, R., et Folgues, J.
1984: Portable magnetometer theodolite with fluxgate sensor for Earth magnetic field component measurements; Geophysical Surveys, v. 6, p. 233-239.

Brankoff, K.
1960: Aufbau eines Magnetfeld Messgerätes nach dem Oberwellenverfaren; Nachrichtentecknik, v. 10, p. 247-256.

Brown, R. E.
1972: A miniature fluxgate magnetometer with sub-gamma noise (DI-GEST); IEEE Transactions on Magnetics; MAG-8, p. 589.

Burger, J. R.
1972a: The theoretical output of a ring-core fluxgate sensor; IEEE Transactions on Magnetics; MAG-8, p. 791-796.
1972b: Comments on "Sensor noise in low-level flux-gate magnetometers"; IEEE Transactions on Magnetics; MAG-8, p. 797-798.

Cahill, L. J., Jr.
1963: A study of the outer geomagnetic field; IEEE Transactions on Nuclear Science, NS-10, p. 10-19.

Candidi, M., Orfei, R., Palutan, F. et Vannaroni, G.
1974: FFT analysis of a space magnetometer noise, IEEE Transactions on Geoscience Electronics (USA), GE-12, p. 23-28.

Chamalaun, F. H. et Walker, R.
1982: A microprocessor based digital fluxgate magnetometer for geomagnetic deep sounding studies; Journal of Geomagnetism and Geoelectricity, v. 34, p 491-507.

Chiron, G., et DeLapierre, G.
1979: Description of a thin film directional magnetometer; IEEE Transactions on Magnetics, MAG-15, p. 1815-1817.

Coon, C. W.
1965: Thermally cycled magnetometer; NASA U.S. Patent 3.564.401, Aug. 1965.

DeLaurier, J.M., Loomer, E.I., Jansen van Beek, G., et Nandi, A.
1974: Editing and evaluating digitally recorded geomagnetic components at Canadian observatories; Publication of the Earth Physics Branch, Ottawa, v. 44, no. 9.

Drosdziok, S.
1973: Magnetometersonden kleinster Abmessungen zur Messung kleiner Magnetfelder, (ATM); Arkiv für technisches Messen, Blatt V391-12, p 189, Lfg. 453.

Drozhzhina, V. I., et Retov, Y. J.
1973: A simple ferroprobe magnetometer; Soviet Journal of Nondestructive Testing, (U.S.A.), v. 9, p. 102-103.

Dyal, P. et Gordon, D. I.
1973: Lunar surface magnetometers; IEEE Transactions on Magnetics, MAG-9, p. 226-231.

Forbes, A. J., et Riddick, J. C.
1984: The digital recording system operated at the UK Magnetic Observatories; Geophysical Surveys, v. 6, p. 393-405.

Gise, P. E., et Yarbrough, R. B.
1975: An electrodeposited cylindrical magnetometer sensor; IEEE Transactions on Magnetics, MAG-11, p. 1403-1404.
1977: An improved cylindrical magnetometer sensor; IEEE Transactions on Magnetics, MAG-13, p. 1104-1106.

Goldschmidt, R.
1910: Die Verkleinerung der Hystereseverluste durch Ströme hoker Frequenz und das Verhalten des Eisens bei Längs — und Quer-Magnetisierung; Electrichnische Zeitschirft, Heft 9, p. 218-221.

Gordon, D. I., et Brown, R. E.
1972: Recent advances in fluxgate magnetometry; IEEE Transactions on Magnetics MAG-8, p. 76-82.

Gordon, D. I., et Lundsten, R. H.
1970: Low field magnetometer sensor of high stability; Revue de Physique Appliquée, v. 5, p. 175-177.

Gordon, D. I., Brown, R. E., et Haben, J. F.
1972: Methods for measuring the magnetic field; IEEE Transactions on Magnetics, MAG-8, p. 48-51.

Gordon, D. I., Lundsten, R. H., Chiarodo, R., et Helms, H. H. Jr.
1967: A highly stable fluxgate magnetometer for space exploration; Symposium on Space Magnetic Exploration and Technology, Reno, Nevada, Aug. 28-30, 1967. (Univ. of Nevada and NASA/AMES Research Center).

Gore, W.
1974: Analysis and design of a fluxgate magnetometer; Publication No. 78-1445, Institute of Geophysics and Planetary Physics, UCLA.

Hedgecock, P. C.
1974: Magnetometer experiments in the European Space Research Organization's HEOS Satellites; Space Science Instrumentation, v. 1, p. 61-82.
1975: A correlation technique for magnetometer zero level determination; Space Science Instrumentation, v. 7, p. 83-90.

Hegymegi, L., et Drimusz, L.
1984: An intelligent digital magnetic recording system; Geophysical Surveys, v. 6, p. 317-321.

Heinecke, W.
1981: Magnetfeldmessung mit Saturationskernsondenmagnetometern; Technisches Messen, V 391-13, 48, p. 3-9.
1978: Fluxgate magnetometer with time coded output signal of the sensor; IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, IM-27, p. 402-405.

Heppner, J. P., et Boroson, H. R.
1966: Wide range linear fluxgate magnetometer; U.S Patent Office 3.258.687, 28. June 1966.

Higuchi, T.
1970: A statistical mode of core noise in half-wave push-pull magnetic amplifiers; IEEE Transactions on Magnetics, p. 847-849.
1971: Experimental study of core noise in various ferromagnetic materials; IEEE Transactions on Magnetics MAG-7, p. 316-319.

Ions, H. R., et Schwec, L. J.
1972: Magnetic thin film magnetometers for magnetic-field measurement; IEEE Transactions on Magnetics, MAG-8, p. 61-65.

Jankowski, J., Marianiuk, J., Ruta, A., Sucksdorff, C., et Kivinen, M.
1984: Long-term stability of a torque-balance variometer with photoelectric converter in observatory practice; Geophysical Surveys, v. 6, p. 367-380.

Kelly, J. M.
1951: Magnetic field measurement with peaking strips; Review of Scientific Instruments, v. 22, p. 256.

Kerr, D.
1972: A direct reading, total feed-back, high performance airborne fluxgate magnetometer; Proceedings of the Institution of Radio & Electronic Engineers Australia, v. 33, p. 339.

Kono, M., Koyanagi, M., et Kokubin, S.
1984: A ring-core fluxgate for spinner magnetometer; Journal of Geomagnetism and Geoelectricity, v. 36, p. 149-160.

Kring Lauridsen, E.
1980: Absolute measurements with proton magnetometers in stationary coils; Danish Meteorological Institute, Geophysical Papers, Copenhagen, R-57.
1984: Absolute measurements of D by means of a proton magnetometer; Geophysical Surveys, v. 6, p. 223-232.
1985: Experiences with the DI-fluxgate magnetometer inclusive theory of the instrument and comparison with other methods; R-71, Geophysical Papers, Danish Meteorological Institute, Copenhagen.

Kuwashima, M., et Sano, Y.
1984: Improved Kakioka Automatic Standard Magnetometer (KASSMER); Geophysical Surveys, v. 6, p. 357-365.

Langvagen, E. N.
1975: A ferroprobe with rotating field excitation; Geofizicheskaya Apparatura (USSR), No. 5, p. 31-37.

Lepping, R. P., et Ness, N. F.
1978: An extension of the dual magnetometer method for use on a dual spinning spacecraft; Journal of Geophysical Research; v. 83, p. 2211-2215.

Ledley, B. G.
1970: Magnetometers for space measurements over a wide range of field intensities; Revue de Physique Appliquée, v. 5, p. 164-168.

Luhr, H., Thurey, S., et Klocker, N.
1984: The EISCAT magnetometer cross; Geophysical Surveys, v. 6, p. 305-315.

Marshall, S. V.
1973: Impulse response of a fluxgate sensor — application to lightning discharge location and measurement; IEEE Transactions on Magnetics, MAG-9, no. 3, p. 235-238.
1977: Using an inverter to measure magnetic fields; IEEE Transactions on Magnetics, MAG-13, p. 1116-1118.

McPherron, R. L., et Snare, R. C.
1978: A procedure for accurate calibration of the orientation of the three sensors in a vector magnetometer; IEEE Transactions on Geoscience Electronics, GE-16, no.2, p. 134-137.

McPherron, R. L., Coleman, P. J., Jr., et Snare, R. C.
1975: ATS-6 UCLA fluxgate magnetometer; IEEE Aerosp. Electr. Syst., AES-11, p. 1110-1116.

Medford, L. V., Maclennan, C. G., Rosenfeld, P. E. Lanzerotti, L. J., et Acuna, M. H.
1981: Low-power portable geophysical data acquisition system and its use in geomagnetic measurements; IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, GE-19, no. 3, p. 122.

Meitzner, W.
1965: Zur Anwendung der Förster-Sonde bei Gesteinsmagnetischen Arbeiten; Zeitschrift für Geophysik, p. 332-344.

Meloni, A., Molina, F., Palangio, P., Taccetti, Q., et DeSantis, A.
1984: Automatic digital recording of geomagnetic elements by means of a proton precession magnetometer; Geophysical Surveys, v. 6, p. 339-350.

Mizuno, Y., Fukui, F., Hashimoto, M., et Takada, M.
1987: Stability of vector proton magnetometer at Memambetsu magnetic observatory; Memoirs of the Kakioka Magnetic Observatory, Japan, v. 22, no.1.

Mohri, K., Takeuchi, S., et Fujimoto, T.
1981: Sensitive magnetic sensors using Wiegand-type ribbons; IEEE Transactions on Magnetics, MAG-17, No. 6, p. 3370-3372.

Mohri, K.
1984: Review on recent advances in the field of amorphous-metal sensors and transducers; IEEE Transactions on Magnetics, MAG-20, No. 5, p. 942-947.

Morton, B. R., et Suckau, K. P.
1976: A micro power fluxgate magnetometer for remote operations; MONITOR-Proceedings of the IREE Australia, v. 37, p. 272-277.

Musmann, G., et Maier, A.
1972: Das Förstersondenexperiment E2 in HELIOS A und B; GAMMA, v. 21, 133 p.

Naito, Y., Tomoda, Y., Uchiyama, A., Ohkura, Y., Nagayama, Y., et Takahashi, Y.
1984: Geomagnetic observations at the Sagami Trough by use of a new type of three-component ocean bottom magnetometer; Journal of Geomagnetism and Geoelectricity, v. 36, p. 239-256.

Narod, B. B., et Russell, R. D.
1984: Steady-state characteristics of the capacitively loaded fluxgate sensor; IEEE Transactions on Magnetics, MAG-20, No. 4, p. 592-7.

Narod, B. B., Bennest, J. R., Strom-Olsen, J.-O., Nezil, F., et Dunlap, R. A.
1985: An evaluation of the noise performance of Fe, Co, Si, and B amorphous alloys in ring-core fluxgate magnetometers; Canadian Journal of Physics, v. 63, p. 1468-1172.

Ness, N. F.
1970: Magnetometers for space research; Preprint x-690-70-78, (NASA TM X-63887), Avail. from: Clearinghouse N70-25202.

Neubauer, F. M., et al.
1986: The Giotto magnetic-field investigations; in: The GIOTTO Mission, ed. R. Reinhard and B. Battrick, ESA SP-1077, ESA Publications Division.

Owen, T. R. E., et Sik, J. M.
1972: A three component fluxgate magnetometer for sea-bottom use; Oceanology International '72, p. 37-40, Department of Geodesy and Geophysics, Cambridge University, England.

Pedersen, B. O.
1960: Phase-sensitive detection with multiple frequencies; IRE Transactions on Instrumentation, I-9, p. 350-355.

Pelen, J.
1966: Un nouveau magnétomètre de restitution d'attitude; Sciences et Industries spatiales, (Suisse); v. 2, p. 55-64.

Pelen, J., Guillemin, G., et Schillinger, A.
1969: Le magnétomètre de restitution d'attitude du satellite aurorae; l'Onde Électrique, v. 49, p. 442-448.

Pellerin, C. J. Jr., et Acuna, M. H.
1968: Two axis fluxgate magnetometers; US Patent Office 3,571,700, Dec. 1968.
1979: A miniature two-axis fluxgate magnetometer; NASA TN D-5325, National Aeronautics and Space Administration, Washington DC, U.S.A.

Podsklan, J., et Kovac, I.
1984: One year experience with the CMVS 2 magnetic variation station; Geophysical Surveys, v. 6, p. 335-338.

Ponomarev, Y. F.
1975: Conversion coefficient of even-harmonic ferroprobes with longitudinal excitation; Defektoskopiya, no. 1, p. 49-56.

Power, J. J.
1973: A digital offset fluxgate magnetometer for use in remote geomagnetic observatories; University of California, Los Angeles, Institute of Geophysics and Planetary Physics, AD-777 885, IGPP-1247-37,AFCRL-TR-73-0603, F19628-72-C-0175.

Primdahl, F.
1970: A ferrite core fluxgate magnetometer; Danish Meteorological Institute, Geophysical Papers, R-12.
1973a: Comments on « The theoretical output of a ring core fluxgate sensor« ; IEEE Transactions on Magnetics, MAG-9, p. 708.
1973b: Fluxgate sensors, principles and properties; Danish Meteorological Institute, Geophysical Papers, R-36.
1979: The fluxgate magnetometer, Journal of Physics E: Scientific Instruments, v. 12, p. 241-253.

Primdahl, F., et Jensen, P. A.
1982: Compact spherical coil for fluxgate magnetometer vector feedback; Journal of Physics E: Scientific Instruments, v. 15, p. 221-226
1986: Noise in the tuned fluxgate; Journal of Physics E: Scientific Instruments, v. 15, p. 637-642.

Reutov, Y. J.
1973: A ferromagnetic probe magnetometer with rectangular excitation; Defekloskopiya, v. 9, No. 2., p. 34-38.

Roy, J. L., Robertson, W. A., et Keeping, C.
1969: Magnetic "field free" spaces for paleomagnetism and other studies; Canadian Journal of Earth Sciences; v. 6, p. 1312-1316.

Russell, C. T.
1974: Apollo particles and fields subsatellite magnetometer experiment; Final Report for NASA Contract NAS 9-12236, N74-33265.
1978: The ISEE 1 — and 2 fluxgate magnetometers; IEEE Transactions on Geoscience Electronics, GE-16, p. 239-242.

Russell, R. D., Narod, B., et Kollar,F.
1983: Characteristics of the capacitively loaded fluxgate sensor; IEEE Transactions on Magnetics, MAG-19, p. 126-130.

Saito, T., Sakurai, T., Yumato, K., et Tamura, T.
1980: Magnetometers for geophysical use. Part 1. Fluxgate magnetometer with a 0.5 m length two-core sensor; Science Reports of Tohoku University, Ser. 5, v. 27, no. 2, p. 85-93.

Saito, T., Sakurai, T., Yumoto, K., Tamura, T., Seto, M. Hayasaka, T., et Aoyama, I.
1980: Magnetometers for geophysical use. Part 2. Test of twelve kinds of ring core; Journal of Geomagnetism and Geoelectricity, v. 32, p. 649-659.

Sanderson. T. R.
1972: A three-axis magnetometer with digital readout, suitable for balloon borne apparatus; Nuclear Instruments and Methods, v. 105, p. 371-376.

Scarzello, J. F., et Usher, G. W., Jr.
1977: A low power magnetometer for vehicle detection; IEEE Transactions on Magnetics, MAG-13, p. 1101-1103.

Scarzello, J. F., Lenko, D. S., Brown, R. E., et Krall, A. D.
1978: SPVD: A magnetic vehicle detection system using a low power magnetometer; IEEE Transactions on Magnetics, MAG-14, p. 574-576.

Schlich, R., Bitterly, J., Deininger, R., et Denier, P.
1975: Observations magnétiques faites? l'observatoire de Dumont d'Urville Terre Adélie 1974; Institut de Physique du Globe, Univ. Pierre et Marie Curie, Paris, France.

Schonstedt, E. O.
1963: Adjustable magnetic core; U.S. Patent Office, 3,076,930.
1965: Magnetic flux directing cylindrical core having a plurality of serially arranged interruptions; U.S. Patent Office, 3,168,696.
1969a: Magnetic field sensor including means to minimize permanent magnetization; U.S. Patent Office, 3,426,269.
1969b: Core assembly of prefabricated parts for a magnetic field sensor; U.S. Patent Office, 3,439,264.
1975: Magnetic locator having sensor units with two-piece housings and tubular cores; U.S. Patent Office, 3,909,704.
1976: Magnetic locator having improved sensors; U.S. Patent Office, 3,961,245.

Schulz, G., et Carstens, U.
1979: A period measuring proton magnetometer with a direct readout; Deutsche Hydrographische Zeitschrift, v. 32, p. 119-125.

Schwarts, W., et Nelms, W. L.
1969: Mechanical aspects of the Lunar Surface Magnetometer; 3'rd Aerospace Symposium, p. 133-138, (Avail. Clearinghouse N69-11816).

Scouten, D. C.
1970: Barkhausen discontinuities in the saturation region; IEEE Transactions on Magnetics, MAG-6, p. 383-385.
1972: Sensor noise in low-level fluxgate magnetometers; IEEE Transactions on Magnetics, MAG-8, p. 223-231.

Seek, J. B., et al.
1974: GSFC magnetic field experiment Explorer 43; NASA TM X 70 609, 52 p, N74-19089.

Serson, P. H.
1973: Instrumentation for induction studies on land; Physics of the Earth and Planetary Interiors, v. 7, p. 313-322.
1974: Compact bias coil systems for geomagnetic measurements; Publication of the Earth Physics Branch, Ottawa, v. 44, p. 243-247.

Serson, P. H., et Primdahl, F.
1972: Bibliography of magnetometers; Publication of the Earth Physics Branch, Ottawa, v. 43, no. 8.

Shturkin, D. A.
1971: Peculiarities in the operation of ferromagnetic probes with longitudinal excitation in measuring magnetic fields over a wide intensity range; Defektoskopiya, No. 6., p. 76-89.

Sitbon, P., et Crespin, J.
1971: Un magnétomètre pour ballon plafonnant; l'Onde Électrique, v. 51, No. 1, p. 44-48.

Skillmann, T. L.
1970: ATS-E magnetic field monitor instrumentation; GSFC, Preprint X-645-70-54.

Smit, J.
1959: The reversible permeability in a biased state; in Ferrites, Chapter 13, section 49.1, p. 260-262, Wiley and Sons.

Smith, E. J., et Sonett, C. P.
1976: Extraterrestrial magnetic fields: achievements and opportunities; IEEE Transactions on Geoscience Electronics, GE-14, p. 154-171.

Snare, R. C., Peters, D. J., Coleman, P. J., Jr., et McPherron, R. L.
1973: Digital data acquisition and processing from a remote magnetic observatory; IEEE Transactions Geoscience Electronics., GE-11, p. 127-134.

Snare, R. C., et McPherron, R. L.
1973: Measurement of instrument noise spectra at frequencies below 1 Hertz; IEEE Transactions on Magnetics, MAG-9, p. 232-235.

Snare, R. C., et Means, J. D.
1977: A magnetometer for the Pioneer Venus Orbiter; IEEE Transactions on Magnetics, MAG-13, p. 1107-1109.

Stuart, W. F.
1972: Earth's field magnetometry; Reports on Progress in Physics, v. 35, p. 803-881.
1984: Geomagnetic Observatory and Survey Practice; editor, reprinted from Geophysical Surveys, v. 6, D. Reidel, Dordrecht/Boston.

Stumm, W.
1973: Techniken der Messung Magnetischer Felder und ihrer Anwendung; Messen und Prüfen, v. 9, p. 29-33, 83-86.

Takeuchi, S., et Harada, K
1984: A resonant-type amorphous ribbon magnetometer driven by an operational amplifier; IEEE Transactions on Magnetics, MAG-20, p. 1723-1725.

Takeuchi, S., Ichioka, S., et Harada, K.
1973: Analysis of mechanism of orthogonal fluxgate thin-film magnetometers; Electrical Engineering in Japan, v. 93, No. 1, p. 130-136.

Theile, B, et Lühr, H.
1976: Magnetfeldmessungen an Bord von Höhenforchungsraketen; Raumfahrtforschung, nr. 6, p. 301-305.

Trenkeer, G.
1972: Verfahren zur Electrichen Messung Magnetischer Felder; Messen und Prüfen, v. 8, p. 535-538, 624-627, 705-708, 793-797.

Trigg, D. F., et Nandi, A.
1984: The automatic magnetic observatory system AMOS III; Earth Physics Branch, Ottawa, Geomagnetic Series, no. 27.

Valet, J.-Y.
1970: Utilisation d'une couche magnétique mince pour la mesure des champs magnétiques très faibles; Centre d'Études Nucléaires de Grenoble, Rapport CEA-R-3930.

Van Bree, J. L. M. J., Poulis, J. A., et Hooge, F. N.
1974: Barkhausen Noise in fluxgate magnetometers; Applied Scientific Research, v. 29, p. 59-68.

Verma, J. K. D., Raju, V., et Aggarwal, M. D.
1972: Measurement of magnetic field, a bibliographical review; Nuclear Instruments and Methods, v. 104, p. 545-574.

Voppel, D.
1972: The proton vector magnetometer at Wingst Observatory; Deutsches Hydrographisches Institut, Erdmagn. Jahrb. v. 17, p. 133-149.

Washino, S, et Ura, K.
1973: A ring-core type fluxgate magnetometer operating at 4.2 K; Japanese Journal of Applied Physics, v. 12, no. 5, 766.

APPENDICE 2

Participants

Ian Bell
Dowty Electronics Ltd
Controls Division
Domain Magnetics
Unit 1 Raleigh Hall
ECCLESHALL, Staffordshire
UNITED KINGDOM ST21 6JL

John Buckle
Scintrex Ltd
222 Snidercroft Road
CONCORD, Ontario
CANADA L4K 1B5

Cyril E. Chapman
Littlemore Scientific Engineering Corporation
Railway Lane, Littlemore,
OXFORD,
UNITED KINGDOM OX4 4P2
téléphone: (0)865 778563
télex: 837686

Richard L. Coles
Division de la géophysique
Commission géologique du Canada
1 Place de l'Observatoire
OTTAWA
CANADA K1A 0Y3
téléphone: (613) 995-5487
télex: 0533117

Hanafy Deebes,
Geomagnetic Department
Helwan Institute of Astronomy and Geophysics
HELWAN
EGYPT
téléphone: 780645
télex: 93070 HIAG UN

Tim Dobush
EDA Instruments Corporation
4 Thorncliffe Park Drive
TORONTO, Ontario
CANADA M4H 1H1
téléphone: (416) 425-7800
télex: 0623222 EDA TOR

Laszlo Drimusz
Technical University of Budapest
Institute of Microwave Engineering
BUDAPEST, Goldmann Gyorgy Ter 1-3
HUNGARY
téléphone: 453-500

Daniel Gilbert
Institut de Physique du Globe de Paris
Tour 24 2ème Étage
4 Place Jussieux
75252 PARIS Cedex 05
FRANCE
téléphone: 43362525
télex: 202810

Arthur W.(Bill) Green, Jr.
U.S. Geological Survey
Mail stop 968
Box 25046
Federal Center,
DENVER, Colorado 80225
UNITED STATES OF AMERICA
téléphone: (303) 236-1363

Bill Griffith
EDA Instruments Corporation
4 Thorncliffe Park Drive
TORONTO, Ontario
CANADA M4H 1H1
téléphone: (416) 425-7800

Lasse Hakkinen
Finnish Meteorological Institute
Box 503
00101 HELSINKI 10
FINLAND
téléphone: 171922
télex: 124436 EFKL

Laszlo Hegymegi
Eotvos L. Geophysical Institute of Hungary
Columbus Utca 17-23
H-1145
BUDAPEST
HUNGARY
téléphone: (1) 635010 or 637256
télex: ELGI 226194

Mike J. Hellard
Dowty Electronics Ltd (Domain Magnetics)
Fallow Park, Rugeley Road, Hednesford,
CANNOCK, Staffordshire
UNITED KINGDOM
téléphone: (05438) 78888
télex: 335004
téléfax: (05438) 78249

Ivan Hrvoic
GEM Systems Incorporated
105 Scarsdale Road
DON MILLS, Ontario
CANADA M3B 2R5
téléphone: (416) 441-3210

Gerrit Jansen van Beek
Division de la géophysique
Commission géologique du Canada
1 Place de l'Observatoire
OTTAWA
CANADA K1A 0Y3
téléphone: (613) 995-5474
télex: 0533117

Zsolt Koros
Technical University of Budapest
Institute of Microwave Engineering
BUDAPEST, Goldmann Gyorgy Ter 1-3
HUNGARY
téléphone: 453-500

Emil Kring Lauridsen
Danish Meteorological Institute
Lyngbyvej 100
Dk-2100 COPENHAGEN
DENMARK
téléphone: 451-292100
télex: 15835 GEOMI

Masayuki Kuwashima
Kakioka Magnetic Observatory
595 Kakioka Yasato-Machi
Niihari Ibaraki 315-01
JAPAN
téléphone: 02994-3-1151

Liu Chang-Fa
Institute of Geophysics
Academia Sinica
P.O. Box 928
BEIJING
CHINA
téléphone: 651031 ext 357
Telegram: 7594

Barry Narod
310 2475 York Avenue
VANCOUVER, B.C.
CANADA V0K 1C9
téléphone: (604) 228-3110
télex: 04 54245

Larry R. Newitt
Division de la géophysique
Commission géologique du Canada
1 Place de l'Observatoire
OTTAWA
CANADA K1A 0Y3
téléphone: (613) 995-5545
télex: 0533117

Ron Niblett
Division de la géophysique
Commission géologique du Canada
1 Place de l'Observatoire
OTTAWA
CANADA K1A 0Y3
téléphone: (613) 992-0935
télex: 0533117

Adolfo Orozco
Teoloyucan Magnetic Observatory
Instituto de Geofisica, UNAM
Ciudad Universitaria
CP 04510, Del. Coyoacan
MEXICO, D.F.
téléphone: (905) 550-5360
télex: 1760197 IGSSME

J.P. Patel
Physics Department
University of Nairobi
P.O. Box 30197
NAIROBI
KENYA
téléphone: 43181 ext 293

Jean-Jacques Periou
Thomson Sintra
Route du Conquet
29283 BREST Cedex
FRANCE
téléphone: 98453820 or 98451515
télex: TCSF 204 780
téléfax: 98050465

D.R.K. Rao
Indian Institute of Geomagnetism
Dr. Nanabhoy Moos Road
Colaba
BOMBAY 400-005
INDIA
télex: 115928 IIG IN

Ole Rasmussen
Danish Meteorological Institute
Lyngbyvej 100
DK 2100
COPENHAGEN
DENMARK
téléphone: 451-292100
télex: 15835 GEOMI

Jaap H. Rietman
Royal Netherlands Meteorological Institute
P.O.Box 201
3730 AE De Bilt
NETHERLANDS
téléphone: (0)30-766911
télex: NL 47096

Renée Segal
Survey of Israel
Research Department
Lincoln Street, 1
P.O. Box 14171
TEL AVIV 61141
ISRAEL
téléphone: 209940 or 209957

Joseph Sevenhuysen
Phoenix Geophysics Ltd.
7100 Warden Avenue, Unit 7
MARKHAM, Ontario
CANADA L3R 5M7
téléphone: (416) 477-8588
télex: 06 986856

Paul. Smith
c/o EDA Instruments Incorporated
4 Thorncliffe Park Drive
TORONTO, Ontario
CANADA M4H 1H1
téléphone: (416) 425-7800
télex: 0623222 EDA TOR

W.F.(Bill) Stuart
British Geological Survey
Murchison House
West Mains Road
EDINBURGH EH9 3LA
SCOTLAND, U.K.
téléphone: 031-667-1000
télex: 727343 SEISED G

Chris G. Sucksdorff
Finnish Meteorological Institute
Box 503
00101 HELSINKI 10
FINLAND
téléphone: 171922
télex: 124436 EFKL

Kendall L. Svendsen
NOAA/NGDC
325 South Broadway
BOULDER, Colorado 80303
U.S.A.
téléphone: (303) 497-6284 or 497-6521
télex: 592811 NOAA MASC BDR

George Tibenski
Scintrex Ltd
222 Snidercroft Road
CONCORD, Ontario
CANADA L4K 1B5

Douglas F. Trigg
Laboratoire géomagnetique
Division de la géophysique
Commission géologique du Canada
1 Place de l'Observatoire
OTTAWA
CANADA K1A 0Y3
téléphone: (613) 837-4241
télex: 0533117

Wozciech Turewicz
Institute of Geophysics
Vl. Pasteura 3
02-093 WARSZAWA
POLAND
téléphone: 221745
télex: PL 814892

Oscar Veliz
Instituto Geofisica del Peru
Observatorio de Huancayo
Departamento de Geomagnetismo
Apartado 46
HUANCAYO
PERU
téléphone: 064-234401

Lanny Wilson
U.S. Geological Survey
MS 964 DFC
Box 25046
DENVER, Colorado 80225
U.S.A.
téléphone: (303) 236-1370

John Wood
U.S. Geological Survey
MS 967 DFC
Box 25046
DENVER, Colorado 80225
U.S.A.
téléphone: (303) 236-1512

Tomas Zelinka
Geophysical Institute
Bochni II C.P. 1401
141 31 PRAHA 4
CZECHOSLOVAKIA
télex: 121546 ION P

Invités

Paul Serson
Ancien directeur de la Division du géomagnétisme
Weldy Hannaford
Ancien chef de la Section des instruments
Don Wallis
Conseil national de recherches

Épouses

Madame Gilbert
Mrs. Hrvoic
Madame Periou
Mrs. Svendsen

Comité d'organisation local

Richard Coles (Président)
Ron Niblett
Doug Trigg
Gerrit Jansen van Beek
Larry Newitt

Division de la géophysique, CGC/ÉMR

Chef de la Section du géomagnétisme
Chercheur principal
Chef de la Section des instruments géophysiques

Personnel technique et de soutien CGC/ÉMR

Jack Thomas
Glenn Brown
Marcel Gervais
Frede Andersen
Sarma Vishnubatla
Daryll Fogal
Blake Wright
Ed Berndt
Jennifer Parmalee
Richard Groulx
Roch Charbonneau
Bob Schieman
Giao Le
André Cregheur
Diane Regimbald
Dean Heuman

APPENDICE 3

Impressions des participants

Durant l'atelier, les participants ont été invité à soumettre quelques paragraphes pour décrire leurs impressions ainsi que les suggestions qu'ils jugent opportun. Plusieurs commentaires comportaient des thèmes communs et c'est sur ceux-ci que Dr.Stuart a largement mit l'emphase dans la conclusion de la section 8. Toutefois, comme chacun a pris le temps de s'exprimer, parfois sur des points qu'eux seuls ont soulevés, il serait bon d'inclure un recueil de chacun des commentaires. Plusieurs de ces commentaires ainsi que leur provenance sont donnés ci-dessous avec quelques modifications mineures afin de contourner les problèmes de langue. Tous les participants ont commenté l'atelier lui-même ainsi que les organisateurs.

Le plus formidable fut sans aucun doute de pouvoir discuter des instruments avec les producteurs. Il a été aussi intéressant de voir comment il est difficile d'avoir une compréhension « compatible » des micro-ordinateurs. **(Sucksdorff et Hakkinen)**

Dans notre division de la géophysique, seulement quelques personnes étaient intéressées ou avaient une certaine expérience avec les instruments d'observation magnétique. Par contre, pour moi l'atelier fut une excellente occasion de rencontrer de gens qui oeuvrent dans le domaine des instruments géomagnétiques et d'observer les développements des autres régions. **(Rietman)**

La possibilité des industries de pouvoir échanger avec les utilisateurs provoque un enrichissement inestimable, ce qui fut le cas à l'atelier. Vous nous avez aidé à apprendre beaucoup sur les instruments et les effets de l'environnement. De plus, une foule d'interrogations ont trouvé solution. **(Bell et Hellard)**

Je pense que cette expérience devrait être répétée aussi souvent que possible car ceci nous donne la possibilité d'échanger des opinions et des expériences. **(Orozco)**

J'espère que cette sorte d'atelier sera tenu régulièrement pour nous permettre de discuter de problèmes d'intérêt commun sur des observatoires magnétiques automatiques idéaux. Ceci nous donne aussi la chance d'échanger des expériences et d'apprendre avec les autres pour finalement approcher la précision dans le domaine des magnétomètres. **(Liu Chang-fa)**

Je souhaitais que ce soit un succès et je peux dire que ca dépasse mes espérances... La seule chose que je peux ajouter c'est que s'il y avait eu plus d'instruments des différents grands pays et d'utilisateurs des autres régions (tel Japon, Australie, Afrique du sud etc.) l'atelier aurait été d'autant plus valable. **(Svendsen)**

Il en ressort que le statut des délégués était idéal mais que le nombre était désappointant. Ceci n'est toutefois pas la faute des organisateurs, mais plutôt du à un climat économique général. **(Chapman)**

Aperçu des fabricants: il y a eu très peu d'occasions où nous avons pu nous asseoir avec plusieurs utilisateurs pour discuter des pours et des contres des instruments que nous distribuons. Je pense que votre atelier permet non seulement de discuter des bases communes de l'équipement présentement disponible mais conjointement des instruments du futur. **(Smith)**

Cet atelier nous a permis d'avoir un survol sur les opérations d'un observatoire moderne en recueillant et traitant une masse considérable de données magnétiques. Nous avons aussi noté un manque de définition des standard dans le format des données du traitement et de la présentation. Finalement, nous voudrions suggérer des standard gradués pour la performance des instruments, c'est à dire standard pour la première classe, la deuxième classe et les besoins opérationnels. **(Hrvoic)**.

Je voudrais préciser qu'il n'y a pas d'intérêt à continuer la discussion avec le terme « mesures absolues » basé sur la technologie d'aujourd'hui seulement pour satisfaire l'évolution de l'histoire. Je suggère plutôt de conserver cette terminologie pour les mesures à précession de protons (PPM). En conclusion, je voudrais dire que le terme « absolu » est un anachronisme. **(Turewicz)**

Les observatoires projetant d'adopter l'enregistrement numérique ne devraient pas nécessairement opter pour les instruments les meilleurs ou les plus facile à comprendre. Il est préférable de se doter d'un instrument simple même s'il est moins qu'idéal et de l'utiliser pour apprendre et développer des procédures d'opération. La disponibilité des ordinateurs, du matériel et du logiciel est aussi importante que la spécification du système en terme d'observatoire standard. **(Stuart)**.